



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**AKI KOPRA**  
**TÄRYTTÄMÄLLÄ ASENNETTUIJEN TERÄSPUTKIPAALUJEN**  
**KANTAVUUDEN MÄÄRITTÄMINEN**  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Tim Länsivaara  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Rakennetun ympäristön tiedekuntaneuvoston kokouksessa 14.8.2013

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

**KOPRA, AKI:** Täryttämällä asennettujen teräsputkipaalujen kantavuuden määrittäminen

Diplomityö, 85 sivua, 12 liitesivua

Elokuu 2013

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastaja: Professori Tim Länsivaara

Avainsanat: Paalu, teräsputkipaalu, täryttäminen, PDA-mittaus, työteline, sillat

Siltatyömailla käytetään pääasiassa lyöntikalustoa paalujen asentamiseen. Väliaikaisten rakenteiden, kuten työtelineiden paaluperustuksia on kuitenkin asennettu myös kaivinkoneeseen kiinnitetyn täryttävän putkeniskijän avulla. Työmaalle ei tällöin tarvita erillistä lyöntipaalutusurakoitsijaa ja kaivinkone soveltuu muuhun työhön paalutuksen päätyttyä. Paalutustyö on tällä menetelmällä todennäköisesti myös sujuvampaa, koska paalujen siirto ja asennus onnistuu samalla laitteella.

Menetelmä ei ole kuitenkaan ohjeiden mukainen tapa asentaa tukipaaluja ja tärytetty paalu vaatii loppulyönnit lyöntikalustolla tai PDA-mittauksella määritetyn kantavuuden ollakseen hyväksytty tukipaalu. Tutkimuksen tavoitteena on tuottaa työmaakäyttöön soveltuva selkeä laskenta- tai tarkistusmenetelmä täryttämällä asennetun paalun kantokyvyn määrittämiseen sekä tietoa paalun asennettavuuden arviointiin pohjaolosuhteiden perusteella.

Tämä diplomityö koostuu kahdesta osasta. Kirjallisuustutkimusosassa käydään läpi paalujen asentamiseen käytettävän täryttimen toimintaperiaate ja maaperäolosuhteiden ja tärytysparametrien vaikutus asentamisen onnistumiseen. Työn toisessa osassa tärytetyn paalun kantavuuden määrittämistä ja kantavuuteen vaikuttavia tekijöitä tutkitaan maastokokeiden avulla.

Kokeissa tärytettävän paalun asennusvoimaa ja tärytyksen taajuutta mitattiin koepaaluihin kiinnitetyillä venymäliuskoilla. Samalla paalun tunkeutumisen nopeutta seurattiin videokameralla. Pysähtymiseen asti tärytetyn paalun kantavuus mitattiin PDA-mittauksella. Jälkeenpäin tutkittiin millainen vaikutus tärytyksen taajuudella, asennusvoimalla ja tunkeutumisnopeudella on paalulle saatavaan loppukantavuuteen.

Tutkimus osoittaa, että täryttämällä asennetuille paaluille on mahdollista saada työtelinekäyttöön riittäviä kantavuuksia. Kantavuus voidaan todeta paalun lopputärytyksen aikaisen tunkeutumisnopeuden avulla. Vaatimuksena on, että paalun lopputärytys tehdään paalun päältä, jolloin täryttimen koko dynaaminen voima saadaan kohdistettua täysin paaluun. Täryttämällä paalujen asentamisen sujuvuus riippuu maaperäolosuhteista, mutta tutkimuksessa havaittiin, että täryttämällä paalujen asentaminen on varsinkin kitkamaassa merkittävästi nopeampaa, kuin tavallisesti käytetyllä lyöntikalustolla asentamalla.

Tärytetyn paalun kantavuuden toteamisen luotettavuuden lisäämiseksi on tehtävä lisää paalutuskokeita erilaisissa maaperäolosuhteissa ja pidemmillä paaluilla. Jotta paalun kantavuuden ja tärytysparametrien välistä yhteyttä voitaisiin paremmin hahmottaa, olisi hyödyllistä asentaa koepaaluihin myös kiihtyvyysanturit.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

**KOPRA, AKI:** Estimating the bearing capacity of vibratory driven steel piles

Master of Science Thesis, 85 pages, 12 appendix pages

August 2013

Major: Municipality Engineering

Examiner: Professor Tim Lämsivaara

Keywords: steel pipe pile, vibratory driven piles, PDA, temporary bridge

In bridge construction sites impact pile drivers are mainly used for pile installation. Piles on temporary structures such as scaffolding bridges have also been driven by excavator mounted vibrators. In this case the bridge building site does not need individual pile driving contractor and the excavator is suitable for any other work when pile driving is complete. Pile driving with this excavator mounted vibrator is likely to be faster than conventional impact pile driving, since the handling and installation of piles can be done with the same device.

To approve the load-bearing capacity of vibrated pile, Pile Driving Analyzer measurement or final driving by an impact hammer is required. The aim of this thesis is to produce a calculation or empirical verification method for vibratory driven pile's bearing capacity. The aim is also to research in which kind of soil conditions vibratory pile driving is reasonable and efficient.

This thesis consists of two parts. Literature study goes through the principles of vibratory pile driving and the key parameters for successful pile driving. The study explains how the different soil conditions affect the driving and the bearing capacity. In the experimental part of the thesis the load-bearing capacity of the vibratory driven pile is determined in two field tests. The tests were conducted in different soil conditions. In Turku, Finland the test piles were vibrated through thick clay layer. In Kälviä, Finland the soil consisted of dense silt and sand layers.

The experimental vibratory driven piles were instrumented with strain gauges. The dynamic and static loads and the frequency of the pile in driving process were measured. At the same time the pile penetration rate was monitored by video camera. Piles were vibrated to refusal and bearing capacity was measured using the PDA measurement. Afterwards attempts were made to find a logical connection between the measured parameters and bearing capacity of the test piles.

The study shows that piles driven with excavator mounted vibrator can have sufficient bearing capacities. The penetration speed of the pile can be used as a tool in determining the bearing capacity. To increase the reliability of determining the bearing capacity more experiments in different soil conditions and different pile lengths are needed. To establish more comprehensive link between vibratory driving parameters and the bearing capacity, it would be useful to instrument the piles with accelerometers.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Insinööritoimisto Seppo Rantala Oy:n tilauksesta. Suuri kiitos työn opastuksesta, rahoituksesta ja mahdollistavien puitteiden luomisesta kuuluu toimitusjohtaja Sami Rantalalle. Kiitos kuuluu myös yrityksen työmaapäälliköille arvokkaista kokemuksesta pohjaavista neuvoista.

Osoitan kiitokseni työn aikana korvaamattomista neuvoista ja ohjauksesta diplomi-insinööri Teemu Riihimäelle ja professori Tim Länsivaaralle. Merkittävästä työpanoksesta kenttäkokeiden läpi viemisessä kiitän Maa- ja pohjarakenteiden laitoksen työntekijöitä Ossi Peltokangasta, Teemu Repoa, Marko Happoa, Ville Haakanaa ja Heikki Luomalaa. Suuri kiitos myös Movax Oy:n Mikko Lindemanille ja Antti Hänniselle teknisestä tuesta.

Sydämellisen kiitos avopuolisolleni Inka Poutaselle kannustavasta tuesta diplomityön ja opintojeni aikana. Suuri kiitos myös kaikille läheisilleni, joilta olen saanut tukea opintojeni varrella.

Tampereella 30.5.2013

Aki Kopra

## Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	8
1.1	Tutkimuksen tausta.....	8
1.2	Tutkimuksen tavoitteet .....	8
1.3	Tutkimuksen rajaukset .....	9
1.4	Tutkimusmenetelmät .....	9
1.5	Aikaisempi tutkimus aiheesta.....	10
2	Paalujen asentaminen täryttämällä.....	11
2.1	Toimintaperiaate.....	11
2.2	Kalustovaihtoehdot.....	15
2.2.1	Staattinen momentti vakio.....	15
2.2.2	Vaihtuva staattinen momentti .....	16
2.2.3	Vaihtuva staattinen momentti ja amplitudi .....	16
3	Teräsputkipaaluille perustettu työteline .....	17
4	Tärytettävän paalun asennettavuus .....	19
4.1	Tärinän välittyminen paalusta maahan.....	19
4.2	Tunkeutumisnopeus.....	20
4.3	Tunkeutumiseen vaikuttavat paalun ominaisuudet .....	20
4.4	Tunkeutumiseen vaikuttavat täryttimen ominaisuudet.....	21
4.4.1	Taajuus .....	22
4.4.2	Amplitudi .....	22
4.4.3	Epäkeskomomentti ja epäkeskovoima .....	23
4.5	Tunkeutumiseen vaikuttavat maakerrosten ominaisuudet .....	23
4.5.1	Dynaaminen vastus kitkamaassa.....	24
4.5.2	Dynaaminen vastus koheesiomaassa.....	24
5	Tärytetyn paalun kantavuus .....	26
5.1	Tärytetyn paalun kantavuuteen vaikuttavia tekijöitä.....	26
5.2	Kantavuuden määrittäminen laskennallisesti .....	27
5.2.1	Geotekninen puristuskestävyys pohjatutkimusten perusteella.....	27
5.2.2	Kantavuuden määrittäminen tärytysparametrien perusteella .....	28
5.3	Kantavuuden määrittäminen GRLWEAP-ohjelmistolla .....	30
5.4	Kantavuuden määrittäminen PDA-mittauksella .....	31

6	Koepaalutukset.....	34
6.1	Käytettävä koelaitteisto .....	34
6.1.1	Venymäliuskat.....	34
6.1.2	Videokamera .....	35
6.1.3	Mikrofoni .....	35
6.1.4	GRLWEAP-ohjelma ja PDA-mittaus .....	35
6.1.5	Koejärjestelyissä käytettävä putkeniskijä ja paalut.....	36
6.1.6	Mittauslaitteiston valmistaminen .....	36
6.2	Koekohteet.....	39
6.2.1	Kirjastosilta, Turku .....	39
6.2.2	Kälviänjoen ratasilta, Kälviä.....	40
6.3	Kokeiden suoritus.....	42
6.3.1	Kirjastosilta, Turku .....	42
6.3.2	Kälviänjoen ratasilta, Kälviä.....	46
6.4	Kokeiden tulosten erittely .....	51
6.4.1	Kirjastosilta, Turku .....	51
6.4.2	Kälviänjoen ratasilta, Kälviä.....	59
7	Tulosten analysointi ja vertailu .....	68
7.1	Kantavuus ja tunkeutumisnopeus .....	68
7.2	Asennusvoima .....	70
7.3	Tärytystaajuus .....	71
7.4	Työnsuoritus .....	72
7.5	Virhelähteet .....	73
7.6	GRLWEAP-simulointi .....	75
7.7	Menetelmä kantavuuden määrittämiseen työmaakäyttöön .....	81
7.8	Työtelinepaalujen asentaminen täryttämällä – työohje .....	82
8	Yhteenveto .....	83
	Lähdeluettelo.....	84
	Liitteet .....	

# TERMIT JA MÄÄRITELMÄT

<b>Kitkamaalaji</b>	Maarakennetta pitää koossa rakeiden välinen kitka (esim. sora ja hiekka)
<b>Koheesiomaalaji</b>	Maarakennetta pitää koossa rakeiden välinen kitka ja koheesio (esim. savi)
<b>Koheesio</b>	Aineen sisäinen vetovoima. Samanlaisten molekyylien molekyylienvälinen yhdistävä vuorovaikutus.
<b>P-aalto</b>	Pitkittäinen kokoonpuristava aaltoliike.
<b>S-aalto</b>	Poikittainen leikkausaaltoliike.
<b>Maaperän vettyminen</b>	Myös maaperän juoksettuminen ja nesteytyminen: Prosessi, jossa vedellä kyllästynyt maaperä väliaikaisesti menettää normaalin kantavuutensa ja käyttäytyy nesteen tavoin.
<b>Paalun kärki</b>	Paalun maahan uppoava alapää
<b>Paalun pää</b>	Paalun yläpää
<b>Paalun vaippa</b>	Paalun seinämän pinta
<b>Tukipaalu</b>	Paalu, joka upotetaan kallion pintaan tai kiinteään pohjakerrokseen, ja jonka kärki ottaa vastaan yläpuolisten rakenteiden kuormat.
<b>Venymäliuska</b>	Materiaalin venymisen mittaamiseen tarkoitettu anturi. Toiminta perustuu siihen, että anturissa olevan metallijohteen muoto muuttuu venytyksen takia ja siksi myös johteen resistanssi muuttuu.

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Siltatyömailla käytetään pääasiassa lyöntikalustoa paalujen asentamiseen. Väliaikaisten rakenteiden, kuten työtelineiden paaluperustuksia on kuitenkin asennettu myös paaluja täryttämällä kaivinkoneeseen kiinnitetyn täryttävän putkeniskijän avulla. Menetelmä ei ole kuitenkaan ohjeiden mukainen menetelmä paalujen asentamiseen ja vaatii loppulyönnit tai PDA-mittauksella määritetyn kantavuuden ollakseen hyväksytty tukipaalu (RIL 254-2011). Täryttämällä asennettujen paalujen tunkeutuvuudesta ja kantavuudesta ei saada luotettavaa tietoa, vaikka pohjaolosuhteet ja paalutyypit tiedettäisiinkin.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tavoitteena on tuottaa työmaalla käytettävä selkeä laskenta- tai tarkistusmenetelmä täryttämällä asennetun paalun kantokyvyn määrittämiseen sekä tietoa paalun asennettavuuden arviointiin pohjaolosuhteet tiedettäessä. Työssä selvitetään myös miten käytössä oleva kaivinkoneliitännäinen tärytyskalusto soveltuu paalujen asennustyöhön parhaiten. Tutkimuksessa pyritään selvittämään millaisessa maaperässä paalujen asennus täryttämällä onnistuu luotettavimmin ja miten eri pohjaolosuhteet vaikuttavat asennuksen nopeuteen. Nämä tutkimuksen tuotokset olisivat merkittäviä työtelineen rakentamisen sujuvuutta ja laatua ja laadunvarmistusta kehittäviä työkaluja urakoitsijalle.

Tutkimukselle on monia taloudellisia ja ajankäytöllisiä perusteluja. Putkeniskijä toimii kaivinkoneessa ja voidaan irrottaa paalutustyön päätyttyä ja siirtää seuraavalle työmaalle tai odottamaan seuraavaa paalutustyötä. Työmaalle ei tällöin tarvita välttämättä erillistä lyöntipaalutuskonetta, joka on raskaampi ja vaatii enemmän tilaa. Paalujen irrottaminen onnistuu myös samalla putkeniskijällä. Kun täryttävä putkeniskijä on kaivinkoneeseen liitetty, paalujen siirtely todennäköisesti myös nopeutuu, koska paalujen siirto ja asennus onnistuu samalla laitteella.

Täryttäen paaluja asentamalla tuotetaan vähemmän melua ja vähemmän haitallista värähtelyä ympäröiviin rakenteisiin kuin asennettaessa lyöntipaaluja. Tämä perustelee täryttämistä asennusvaihtoehtona rakentamisen ympäristömääräysten jatkuvasti tiukentuessa. Täryttämällä paalujen asentaminen vaatii vähemmän energiaa ja aiheuttaa vähemmän rasituksia paaluun kuin lyömällä asentaminen (Lammertz, 2006). Täryttämällä asennettu paalu vaatii kuitenkin tällä hetkellä loppulyönnit tai PDA-mittauksen ollakseen tukipaalu, mikä poistaa täryttämällä paalujen asentamisen sujuvuuden ja taloudelliset ja ympäristölliset edut.



***Tutkimuksen pääongelma:***

Millaisilla menetelmillä täryttämällä asennetun paalun kantokykyä tulee mitata tai ennakoida, jotta tieto on luotettava ja sitä voidaan hyödyntää luontevasti työmaalla?

***Tutkimuksen alaongelmat:***

Saadaanko paalu asennettua riittävän tiukkaan käytössä olevalla tärytyskalustolla?

Millaisessa maaperässä paalujen asennus täryttämällä onnistuu luotettavimmin?

**1.3 Tutkimuksen rajaukset**

Pääpainona tutkimuksessa on millaisilla menetelmillä täryttämällä asennetun paalun kantokykyä tulee mitata, jotta tieto on luotettava ja sitä voidaan hyödyntää työmaalla. Tutkimuksessa keskitytään teräsputkipaalujen asentamiseen, sillä niiden asentamisesta täryttämällä on urakoitsijalla jo hyviä kokemuksia, ja lisäksi teräsputkipaalu on kaikkein monikäyttöisin paalutyyppeistä siltatyömailla. Tutkimuksessa asennetaan paaluja ainoastaan avoimella kärjellä. Tutkimuksesta jätetään tarkoituksella pois paalun rakenteellinen tutkimus ja paalun rakenteen käyttäytyminen, kuten rakenteelliset muutokset paalua tärytettäessä. Ulkomaista kirjallisuutta läpikäyessä keskitytään tutkimuksiin, joissa on tarkasteltu menetelmän toimivuutta Suomen pohjaolosuhteiden kaltaisissa maaperissä, erityisesti kivisissä maissa, joihin paalujen asentaminen saattaa olla erityisen hankalaa. Tärytystyön aiheuttaman värinän vaikutukset ympäröivässä maaperässä jätetään pääasiassa tutkimuksen ulkopuolelle.

**1.4 Tutkimusmenetelmät**

Tutkimus tehdään kokeellisena tutkimuksena ja kirjallisuustutkimuksena. Aluksi tutustaan aiempaan tutkimukseen paalujen täryttämisestä ja keskitytään tekijöihin, jotka vaikuttavat paalujen asennettavuuteen ja kantokykyyn tällä menetelmällä. Tutkimuksia ponttiseiniä asentamisesta täryttämällä voidaan hyödyntää, kun tutkitaan maan vastusta tärytystyössä, sillä asennustyön toimintaperiaate on sama kuin paaluja tärytettäessä. Kokeellinen tutkimus pyritään tekemään oikeilla siltatyömailla telinepaalutuksen yhteydessä. Paalutuskokeet tehdään siltatyömaiden aikataulujen ehdoilla. Tavoitteena on saada tutkittavaksi 2–3 oikeata kohdetta. Täryttämällä paaluja pyritään asentamaan eri syvyyksiin ja eri tiukkuuksiin monipuolisen ja vertailtavan aineiston saamiseksi. Täryttämällä asennettujen paalujen kantokykyä verrataan lyömällä asennettujen paalujen kantokykyyn PDA-mittauksen avulla. Täryttämällä asennettujen paalujen kantavuutta ja käyttäytymistä asennustyössä pyritään mallintamaan tietokoneella WEAP-ohjelmistolla. Luotettavat tiedot pohjaolosuhteista vaikuttavat merkittävästi mallinnuksen todenmukaisuuteen ja empiiristen ja laskennallisten tulosten vertailtavuuteen, joten pohjatutkimuksia koekohteista on saatava kattavasti ennen koerakenteiden asentamisen suunnittelua.

## 1.5 Aikaisempi tutkimus aiheesta

Internet-hauilla Suomalaista tutkimusta aiheesta ei löydy lähes ollenkaan. Teknistieteellisistä tietokannoista on saatavilla jonkin verran ulkomaalaisia julkaisuja aiheesta. Näissä tutkimuksissa on keskitytty usein erilaisiin aaltoliikemalleihin, joilla ponttiseinän ja paalujen käyttäytymistä tärytyksessä mallinnetaan. Merkittävästi enemmän on tehty tutkimuksia, joissa on tarkkailtu ponttiseinän asennettavuutta tärytyksellä, mutta tätä aineistoa pystytään soveltaen hyödyntämään myös paalujen käyttäytymisen mallintamiseen. Täryttämällä asennetun paalun kantavuuden määrittämisen keskittyviä tutkimuksia on vain muutama. Esimerkiksi Ruotsissa ja Yhdysvalloissa paalun asennus täryttämällä on enemmän käytetty ja tutkittu menetelmä, mutta ei kuitenkaan virallistettu, vaan näin asennettu paalu vaatii loppulyönnit ollakseen hyväksytty tukipaalu. Näissä tutkimuksissa on erona tämän diplomityön tutkimukseen se, että putkeniskijä on kiinni paalutuskoneessa tai roikkuu nosturin vaijerista ja tärytyksen taajuus on usein alempi Suomalaisiin kaivinkoneeseen kiinnitettävään putkeniskijään verrattuna.

## 2 PAALUJEN ASENTAMINEN TÄRYTTÄMÄLLÄ

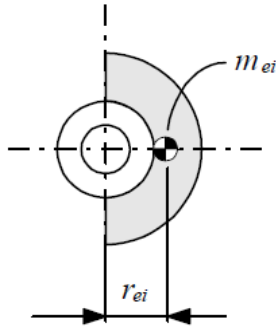
Lähes kaikkia lyöntipaaluiksi tarkoitettuja paaluja voidaan asentaa myös täryttämällä. Paalujen täryttäminen tulee kyseeseen esimerkiksi silloin, kun halutaan vähentää ympäristölle koituvia melu- ja värinähaittoja. Joissakin tapauksissa täryttämällä saadaan paaluun kohdistettua enemmän energiaa kuin pudotusjärkäleellä, esimerkiksi vinopaaluja asennettaessa. (Kemppainen, 2006.)

### 2.1 Toimintaperiaate

Nykyiset tärytyslaitteet paalujen asentamiseen toimivat pääasiassa hydraulikalla. Tässä tutkimuksessa keskitytään laitteisiin, jotka saavat voimansa alustana toimivan kaivinkoneen hydraulikasta. Täryttimen sisällä pyörivät epäkeskiset painot saavat aikaan pystysuuntaisen tärytysvoiman, joka kohdistetaan paaluun. Epäkeskopainot pyörivät vierekkäin samassa tasossa samalla nopeudella ja samassa vaiheessa, mutta eri suuntiin. Tärytin liikkuu tällöin ainoastaan pystysuorassa, sillä pyörivien painojen keskipakoisvoimien vaakasuuntaiset komponentit kumoavat toisensa. Tärytysvoimaa voidaankin rinnastaa pyörivien epäkeskopainojen keskipakoisvoimaan. (Massarsch, 2000.)

Paaluun jäykästi kiinnittynyt tärytin saa paalun ja sitä ympäröivän maan värähtelemään. Tämä hetkellinen maapartikkeleiden jännitystila aiheuttaa maan vastuksen heikentymisen paalun tuntumassa. Paaluun kohdistuu tällöin epäkeskopainojen pyörimisliikkeestä aiheutuva jaksottainen epäkeskovoima ja kaivinkoneen puomin painatuksesta sekä putkeniskijän massasta johtuva staattinen voima. Värähtelevä paalu vähentää paalun vaipan ja ympäröivän maan välistä kitkaa merkittävästi, jolloin paalu painuu syvemmälle maahan verrattain pienellä painavalla voimalla. (Smith, 1960.)

Pyörivien epäkeskopainojen massan ja niiden massakeskipisteen etäisyyden pyörimisakselista avulla voidaan johtaa täryttämisessä oleellinen käsite vääntömomentti. Epäkeskomomentti  $M_e$  on esitetty lausekkeessa 1. (Viking, 2002.) Kuva 1 on havainnollistettu epäkeskopainon massakeskipisteen sijainti.



**Kuva 1.** Epäkeskopaino ja massakeskipisteen etäisyys pyörimisakselista.

$$M_e = \sum m_e \cdot r_e \quad (1)$$

missä

$M_e$  = epäkeskomomentti [kgm]

$m_e$  = epäkeskopainon massa [kg]

$r_e$  = epäkeskopainon painopisteen etäisyys pyörimisakselista [m]

Vääntömomenttia kutsutaan tässä tapauksessa myös staattiseksi momentiksi, joka on riippumaton epäkeskomassojen pyörimisnopeudesta. Tärytystaajuus  $f_d$  kertoo epäkeskomassojen kierrosten määrän sekunnissa, joskus tärytystaajuus on myös ilmaistu kierroksina minuutissa. Epäkeskomassojen kierrosnopeus voidaan myös ilmaista kulmataajuutena  $\omega$ . Kulmataajuus on esitetty lausekkeessa 2. (Viking, 2002, s.17.)

$$\omega = 2\pi f_d = \frac{2\pi n}{60} \quad (2)$$

missä

$\omega$  = kulmataajuus [rad/s]

$f_d$  = tärytystaajuus [Hz]

$n$  = kierroksia minuutissa [rpm]

Keskipakoisvoima  $F_c$ , jota kutsutaan täryttimiä käsitellessä myös epäkeskovoimaksi, saadaan Newtonin toisen lain nojalla ja keskeiskiihtyvyyden lausekkeen  $a_c = r_e \cdot \omega^2$  avulla johdettua, on epäkeskomomentin ja kulmanopeuden neliön tulo, joka on esitetty lausekkeessa 3. Tärytettävään elementtiin kohdistuu suurin epäkeskovoima, kun epäkeskopainojen massakeskipiste on alimmassa kohdassa liikeradallaan, tällöin  $F_c = F_v$ . (Viking, 2002, s.19.) Kuvassa 2 näkyy epäkeskopainoihin kohdistuvat voimat, joista vaakasuuntaiset komponentit kumoavat toisensa, kun epäkeskopainot samassa tasossa samalla nopeudella ja samassa vaiheessa, mutta eri suuntiin.

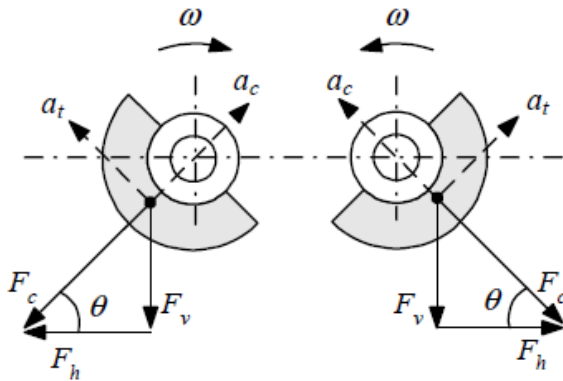
$$F_c = \frac{F_v}{\sin \theta} = m_e \cdot a_c = m_e \cdot r_e \cdot \omega^2 = M_e \cdot \omega^2 \quad (3)$$

missä

$F_v$  = suurin täryttävään elementtiin kohdistuva keskipakoisvoima [N]

$a_c$  = keskeiskiihtyvyys, [m/s<sup>2</sup>]

$\omega$  = kulmanopeus [rad/s]



**Kuva 2.** Epäkeskopainoihin pyörimisliikkeessä kohdistuvat voimat.

Teoreettinen paalun päähän kohdistuva voima  $F_d$  muodostuu staattisesta painatusvoimasta  $F_0$  ja pystysuorasta dynaamisesta epäkeskovoimasta  $F_v$ .  $F_d$  voidaan ajatella täryttimen teoreettisena paalutusvoimana, joka voidaan esittää muodossa:

$$F_d = F_0 + F_v \quad (4)$$

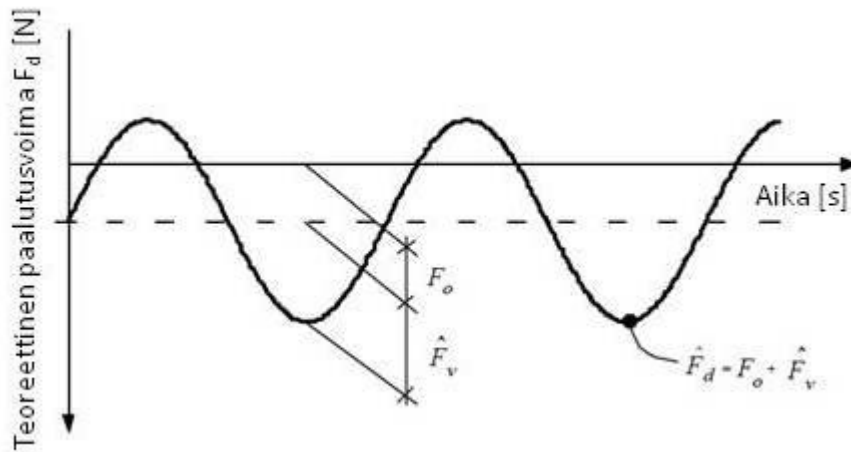
missä

$F_d$  = teoreettinen paalutusvoima [N]

$F_0$  = staattinen painatusvoima [N]

$F_v$  = epäkeskovoima [N]

Staattinen painatusvoima muodostuu koko täryttimen massasta, ja mikäli tärytin toimii kaivinkoneeseen kiinnitettynä, on painatusvoimaan lisättävä paino, jolla kaivinkone painaa puomillaan tärytintä. Staattinen painatusvoima siirtää dynaamisen ja jaksollisen epäkeskovoiman nollakohdan sijaintia, kuten voidaan havaita Kuva 3. (Viking, 2002, s. 21.)



**Kuva 3.** Teoreettinen paalutusvoima ajan funktiona.

Toinen oleellinen suure, joka yleensä listataan tärzyttimen ominaisuuksissa, on siirtymän amplitudi  $s$ , joka on esitetty lausekkeessa 5. Yhdessä keskipakoisvoiman kanssa siirtymäamplitudi määrittää laitteiston paalun asennuskapasiteetin. Paalun ollessa kiinni kourassa ilman maakontaktia riippuu amplitudi ainoastaan vääntömomentista ja dynaamisesta massasta  $m_d$ , joka on tärzyttävien massojen summa. (Viking, 2002, s. 21.) Mikäli tärzytin toimii kaivinkoneeseen kiinnitettynä, dynaamiseen massaan lisätään vielä paino, jolla kaivinkone painaa puomillaan tärzytintä.

$$s = \frac{M_e}{m_d} \quad (5)$$

missä

$s$  = siirtymän amplitudi [m]

$m_d = m_{vibra} + m_{paalu}$  [kg]

$m_{vibra}$  = tärzyttävän osan massa [kg]

$m_{paalu}$  = paalun massa [kg]

Paalun värähdellessä maassa värähtelyn amplitudi pienenee riippuen maan värähtelyvastuksesta. Maa värähtelyvastus muodostuu yhdessä paalun vaippa- ja kärkivastuksesta. Kun oletetaan, että paalun kärki ei ole uponnut kovaan maakerrokseen voidaan värähtelyamplitudille  $s_p$  johtaa alla oleva lauseke (6). (Massarsch, 2000.)

$$s_p = \frac{1}{m_d} \left( M_e - \frac{R_{vaippa}}{\omega^2} \right) \quad (6)$$

missä

$R_{vaippa}$  = dynaaminen vaippavastus

Tärytinvalmistajat ilmoittava usein laitekohtaisen teoreettisen tehon  $P_t$  [kW]. Ilmoitettu teho vastaa nimellistä tehoa, jolla hydraulinen moottori pyörittää epäkeskopainoja. Teoreettinen ilmoitettu teho on täryttimen parametri ja ei vastaa paalun upotustehokkuutta maahan. Todellinen käytännön teho, jolla paalu saadaan asennettua maahan, riippuu maan dynaamisesta vastuksesta ja siten pohjaolosuhteista. (Viking, 2002.)

## 2.2 Kalustovaihtoehdot

Tässä kappaleessa on esitelty erilaisia paalujen ja ponttien maahan asentamiseen tarkoitettuja tärytyslaitteita. Laitteiston kehityskulku on esitetty seuraavissa alakappaleissa kronologisessa järjestyksessä. Tässä tutkimuksessa keskitytään pääasiassa täryvasaroihin, joiden staattinen momentti on vakio.

### 2.2.1 Staattinen momentti vakio

Tämä on vanhin versio tärytyslaitteista, joilla paaluja voidaan asentaa, niin kutsuttu ensimmäisen sukupolven tärytin. Näissä tärytyslaitteissa epäkeskopainot ovat kiinteät verrattuna seuraaviin versioihin ja laitteiden staattinen momentti on tällöin vakio. Kuvassa 4 on esitetty Movax SP-60W putkeniskijä, jossa staattinen momentti on vakio. Keskipaikoisvoimaa voidaan muuttaa kasvattamalla tai pienentämällä epäkeskomassojen pyörimisnopeutta. Laitteen käyttöikä riippuu pitkälti epäkeskomassojen laakereiden kunnosta. Pitkää käyttöikää tavoiteltaessa on siis edullista käyttää pienempää taajuutta, mikä toisaalta voi vähentää paalun tunkeutuvuutta ja voi lisätä ympäristöön välittyvää tärinää. (Massarsch, 2000.)



**Kuva 4.** Kaivinkonekäyttöinen täryvasara Movax SP-60W, jossa putkipaalun ympärille tarttuvat putkileuat.

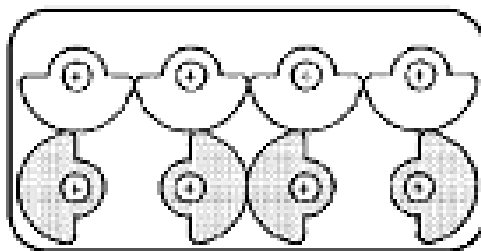
### 2.2.2 Vaihtuva staattinen momentti

Näissä laitteissa staattista momenttia voidaan muuttaa portaittain, vaihtamalla epäkeskopainoja. Tätä laitetyppeä pidetään toisen sukupolven täryttimenä. Laitteen ollessa pois päältä voidaan epäkeskomassoja ottaa pois tai lisätä. Staattisen momentin muuttaminen on täten työlästä ja aikaa vievää. Epäkeskopainoja poistamalla voidaan tärytystaajuutta kasvattaa ja vastaavasti epäkeskopainoja lisäämällä taajuus pienenee. (Massarsch, 2000.)

Tätä tärytyslaitetyppeä on kutsuttu myös korkeataajuustäryttimeksi. Tärytimessä on laakereiden kulumista vähentävä voitelu- ja jäähdytysjärjestelmä. Vaihtuvalta staattisella momentilla varustettu laite sopii hyvin vaihteleviin pohjaolosuhteisiin. Tällä ja ensimmäisen sukupolven täryttimellä on kuitenkin haittapuolena se, että käynnistysvaiheessa laite käy läpi koko taajuusalueen nolasta tärytystaajuuteen, mikä aiheuttaa paalun ja maan välisen resonanssihiikin alhaisilla taajuuksilla, mistä voi olla haittaa ympäristölle. (Massarsch, 2000.)

### 2.2.3 Vaihtuva staattinen momentti ja amplitudi

Tätä kolmannen sukupolven tärytintä kutsutaan myös nolla-amplituditäryttimeksi. Laitteessa epäkeskopainot on sijoitettu pareittain kahteen päällekkäiseen riviin. Tällöin staattista momenttia ja siten myös amplitudia voidaan muuttaa jatkuvasti ja mielivaltaisesti tärytyksenkin aikana. Alemman rivin epäkeskopainojen asemaa suhteessa ylemmän rivin painoihin voidaan muuttaa vaihdelaatikon avulla. Tällä tavalla amplitudia ja staattista momenttia voidaan helposti muuttaa. (Massarsch, 2000.) Kuva 5 on esitetty periaatekuva täryttimen epäkeskopainojen asettelusta.



**Kuva 5.** Periaatekuva nolla-amplituditäryttimen epäkeskopainoista.

Muutettavalla taajuudella ja staattisella momentilla varustetulla laitteella on muutamia merkittäviä etuja. Käynnistys- ja sammutusvaiheessa haitallista resonanssihiikkiä ei tule, jolloin tärytintä voidaan käyttää tilanteissa, joissa ympäröivät rakenteet sallivat vain vähäistä tärinää. Tämän ominaisuuden johdosta myös ylimääräinen tärytyslaitteistoon kohdistuva rasitus vähenee. Haittapuolena tällaisessa tärytyslaitteistossa on, että epäkeskomassojen laakerit ovat kokoajan suuressa rasituksessa, vaikka värähtelyamplitudikin olisi pieni. Jatkuva huolto ja ylläpito ovat siten tärkeitä laitteen keskeytyksettömän käytön varmistamiseksi. (Massarsch, 2000.)



### 3 TERÄSPUTKIPAALUILLE PERUSTETTU TYÖTELIN

Urakoitsijan työtelineen perustuspaaluina ja samalla pilareina käytetään useimmiten pituussaumahitsattua 323,9 x 5,0 teräsputkea. Pilareita jatketaan tarvittaessa hitsaamalla. Paalut asennetaan usein lyömällä tiiviiseen maakerrokseen tai kalliota vasten. Usein paaluryhmän jakoväli pituus- ja poikkisuunnassa on 4 metriä. Paaluryhmän leveys riippuu työtelineen vaadittavasta leveydestä, joka riippuu rakennettavasta kohteesta. Kuva 6 on tyypillisen työtelineen paalut ja kansipalkisto.



**Kuva 6.** Tyypillinen sillan työteline.

Pilareiden päälle hitsataan poikkisuunnassa riveittäin HE300B-teräspalkki. Tämän jälkeen asennetaan pituussuuntainen kansipalkisto HE200B-teräspalkeista yleensä 900 mm:n jaolla. Työtelineen vinosidonta sivukuormille tehdään kannen suuntaisilla vinositeillä. Vinositeet ovat usein neliöputkipalkkia 80x80x4. Paalujen teräslaatu on S355 muiden teräsosien yleensä S235 tai S355. Kannen pintarakenteena on kansilankutus, jonka päälle asennetaan tarvittaessa tilanteen mukaan suodatinkangas, jonka päälle levi-

tetään ohut kerros mursketta. Työtelineen rakenneosia pyritään hyödyntämään uudelleen seuraavissa rakennuskohteissa.

Työtelineen poikkileikkauksen leveys vaihtelee rakennuskohteen tarpeiden mukaan. Tyypillisesti poikkileikkauksessa on rivissä kolme tai neljä paalua. Urakoitsijan suunnitelmien mukaan suurin yksittäiseen työtelineen paaluun kohdistuva ominaiskuorma rakennuskohteessa riippuen on noin 400...600 kN. Suurimmat kuormat työtelineeseen kohdistuvat kuormitustilanteessa, jossa työtelineen päällä on teräspalkkipaalu- tuskone ja valutilanteessa, kun työtelineen päältä betonoidaan sillan kantta.

## 4 TÄRYTETTÄVÄN PAALUN ASENNETTAVUUS

Kappaleessa käsitellään aluksi miten tärinä välittyy tärytettävästä paalusta ympäröiviin maakerroksiin, jotta voidaan selkeämmin hahmottaa mitkä tekijät ovat olennaisia tarkasteltaessa paalun tunkeutuvuutta. Kappaleessa on seuraavaksi käyty läpi miten tärytysasennuksen eri osien, paalun, täryttimen ja maaperän ominaisuudet vaikuttavat paalun asennettavuuteen.

Paalu tunkeutuu maahan täryttämällä hieman eri periaatteella kuin lyöessä. Lyöntijärkälä ei ole kiinteästi kiinni paalussa ja iskuenergia välittyy paaluun iskutyynyn välityksellä jolloin osa energiasta menee hukkaan. Tämän lisäksi joka iskulla järkäleen on saatava paalu liikkeelle levosta kiihtyvään liikkeeseen ja voitettava maan dynaaminen vastus. Täryttävä paaluniskijä on kuitenkin kokoajan jäykästi kiinni paalussa, joten merkittäviä energiahäviötä ei synny. Suurin osa energiasta menee maan kärkivastuksen voittamiseen. Loput liike-energiasta kuluu maan ja paalun vaipan väliseen kitkaan ja muuttuu lämmöksi. (Massarsch, 2000.)

### 4.1 Tärinän välittyminen paalusta maahan

Yksinkertaisimmillaan voidaan todeta, että paalutuksen maaperään aiheuttama tärinä syntyy paalun vaippavastuksen ja paalun kärkivastuksen vaikutuksesta, jolloin tärinän liike-energia leviää ympäröivään maahan osittain paalun vaipasta ja osittain paalun kärjestä. Se kuinka paljon energiaa siirtyy vaipan ja kuinka paljon kärjen välityksellä riippuu ympäröivän maan dynaamisista ominaisuuksista. (Woods, 1997.) Paalun vaipalla maaperään syntyy leikkausaaltoja (s-aalto) paalun ja maan välisestä liikkeestä, tai ympäröivän maan elastisesta muodonmuutoksesta johtuen. Leikkausaallot etenevät alapäin osoittavan kartion muotoisena rintamana paalun varresta ulospäin. Paalun kärjessä iskujen seurauksena syntyy p- ja s- aaltoja, jotka leviävät pallomaisena rintamana ympäristöön. Vaikka paalu onkin pystysuuntaisessa värähtelyliikkeessä tunkeutuessaan maahan, maakerroksissa värähtely välittyy sekä pysty, että vaakasuunnassa. (Massarsch, 2000; Woods, 1997.)

Paalun tärinään ja maan tiivistymiseen kohdistuneet kenttämittaukset ovat osoittaneet, että paalun pystysuora värähtelyliike aiheuttaa maassa pysty- ja vaakasuuntaisia värähtelysyklejä. Vaakasuuntainen värähtelyliike maassa aiheutuu maan ja paalun vaipan välisestä kitkasta ja on suuruusluokaltaan noin 30...50 % pystysuorasta värähtelykomponentista. Vaakasuuntaisen värähtelyn taajuus on kaksinkertainen paalun pystysuoraan värähtelytaajuuteen verrattuna. Ilmiöllä on myös vaikutusta tärytetyn paalun kantavuuteen, sillä se aiheuttaa maan jännitysten uudelleen järjestäytymistä. Tärytyksen

aiheuttama vaakasuuntainen värähtelyliike myös tiivistää maata paalun ympärillä. (Massarsch, 2000.)

## 4.2 Tunkeutumisenopeus

Tärytettävän paalun tunkeutuvuutta voidaan havainnollistaa seuraamalla paalun tunkeutumisenopeutta  $v_p$ . Tunkeutumisenopeus on yleensä ilmoitettu millimetreinä sekunnissa [mm/s]. Raon (1993) mukaan Teksasissa tehdyn koerakennetutkimuksen tuloksista johdettiin ponttiseinän tunkeutumisenopeudelle kolmetasoinen asteikko helposta haastavaan. Asteikko on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Tunkeutumisenopeuden  $v_p$  [mm/s] luokittelu ja vastaavat nopeudet.

Vaikea	Kohtalainen	Helppo
$v_p < 22$	$22 < v_p < 60$	$v_p > 60$

Vaikeaksi asennusolosuhteet luokitellaan, mikäli tunkeutumisenopeus on alle 22 mm/s. Asennusolosuhteet ovat kohtalaiset, kun tunkeutumisenopeus on 22...60 mm/s ja helpot kun tunkeutumisenopeus on yli 60 mm/s. TESPA:n (Technical European Sheet Piling Association) ohjeen (1995) mukaan ponttiseinän asennettavuuden rajana voidaan pitää 8 mm/s tunkeutumisenopeutta.

## 4.3 Tunkeutumiseen vaikuttavat paalun ominaisuudet

Paalun dynaamiset ominaisuudet massa ja jäykkyydestä riippuva impedanssi ovat merkittäviä tekijöitä, jotka vaikuttavat tärytysenergian siirtymiseen maassa. Impedanssi  $Z$  on esitetty seuraavassa lausekkeessa (7). Impedanssi voidaan esittää myös kimmomoduulin  $E$  funktiona.

$$Z = \rho \cdot c_b \cdot A = \frac{E \cdot A}{c_b} \quad (7)$$

missä

$\rho$  = paalun tiheys [kg/m]

$c_b$  = aallon etenemisnopeus [m/s]

$A$  = paalun poikkileikkauksen pinta-ala [m<sup>2</sup>]

Dynaaminen voima, joka paaluun kohdistetaan ja paalua pitkin välittyy, voidaan ilmaista impedanssin ja paalun heilahdusnopeuden  $v$  [m/s] tulona.

$$P = Z \cdot v = \frac{E \cdot A}{c_b} \cdot v \quad (8)$$

Voiman  $P$  on oltava riittävän suuri, jotta kärki- ja vaippavastuksen yhteisvaikutus ylittyy. Kuten lausekkeesta 8 ilmenee, paalun impedanssi rajoittaa suurinta voimaa, joka voidaan paalua pitkin paalun kärkeen välittää. Impedanssia voidaan vähentää pienentämällä paalun halkaisijaa tai seinämävahvuutta, jolloin paalun poikkileikkauksen pinta-ala pienenee. Paaluun kohdistettu dynaaminen voima voidaan esittää lyönti- ja tärytystilanteessa lausekkeella 8, mutta aaltoliike ilmenee paalussa eri tavoin. Lyöntipaalutuksessa aallonpituus on lyhyempi kuin paalun pituus ja aaltoliike etenee hyökyaaltomaisesti. Tärytettäessä paalua aaltoliike on taajuuksista ja aallonpituus on pidempi. (Massarsch, 2000.)

Tärytystyössä paalu ja tärytin ovat kiinteästi toisissaan kiinni ja ovat pystysuorassa oskilloivassa liikkeessä. Paalun ja maan pystysuorassa värähtelyliikkeessä vaippavastus vähenee hetkellisesti jokaisessa heilahdusyksikössä. Tällöin paalu tunkeutuu syvemmälle maahan paalun ja täryttimen massan ajamana ja asennuskoneen puomin painattamana. Paalu lopettaa maahan tunkeutumisen, kun paalun kärkivastus on suurempi kuin edellä esitetyt alaspäin vaikuttavat voimat. Paalua tärytettäessä vaippavastuksen osuus maan kokonaisvastuksessa on pienempi kuin kärkivastuksen. Yleisesti ottaen täryttävät paaluniskijät soveltuvat parhaiten kärjistään avoimiin paaluihin, sillä niillä on pieni kärkivastus. Toisin kuin paaluja lyömällä asennettaessa, tärytyksessä paalun kärjen ja maan välinen kontakti häviää jokaisen tärytyssyklin aikana. Tällä jännityksen vapauttavalla ilmiöllä on edullinen vaikutus paalun tunkeutumiselle verrattaessa lyömällä paalun asentamiseen. (Massarsch, 2000.)

#### 4.4 Tunkeutumiseen vaikuttavat täryttimen ominaisuudet

Seuraavat täryttimen ominaisuudet vaikuttavat dynaamiseen vastukseen paalun vaipalla ja kärjessä:

- Tärytystaajuus,  $f_d$
- Siirtymäamplitudi,  $S$
- Epäkeskomomentti,  $M_d$  (Viking, 2002.)
- Heilahdusnopeus
- Tärytyssykliden määrä (Massarsch, 2000.)

Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi painumiseen vaikuttaa täryttävän osan paino ja asennuskoneen puomin painatus. Näiden tekijöiden kasvattaminen helpottaa useimmissa tapauksissa paalun tunkeutumista. (Viking, 2002, s.35.)

Massarsch (2000) on luokitellut suuntaa-antavasti eri tärytysparametrien vaikutusta paalujen asentamiseen koheesio- ja kitkamaassa (Taulukko 2) Parametrien merkitystä on avattu ja perusteltu tässä kappaleessa 4.4 ja kappaleessa 4.5.

**Taulukko 2.** Tärytettävän paalun tunkeutumiseen vaikuttavat tekijät.

<b>Kitkamaa</b>	Vaippavastus			Kärkivastus		
	löyhä	keskitiivis	tiivis	löyhä	keskitiivis	tiivis
Maakerroksen tiiviyys						
Tärytystaajuus	++	+++	+++	+	++	+++
Amplitudi	+	+	++	+	+	+
Tärytyssykkien määrä	--	+	++	--	+	++
<b>Koheesiomaa</b>	Vaippavastus			Kärkivastus		
	löyhä	keskitiivis	tiivis	löyhä	keskitiivis	tiivis
Maakerroksen tiiviyys						
Tärytystaajuus	-	--	---	-	--	---
Amplitudi	+++	+++	+++	++	++	++
Tärytyssykkien määrä	+	+	++	+	++	+++

#### 4.4.1 Taajuus

Heereman (1979) ponttiseinille tekemien laboratoriotestien mukaan dynaaminen vaippavastus on täysin riippumaton valitusta tärytystaajuudesta. Viking (2002) kuitenkin osittain kyseenalaistaa tuloksen, sillä laboratorio-olosuhteet eivät täysin vastanneet aitoja kenttäolosuhteita, koska hiekkarakeiden väliset sisäiset voimat eivät vaikuttaneet tehdyssä kokeessa. Hän myöntää, että voimien huomiointi ei hyvin todennäköisesti kuitenkaan vaikuttaisi tulokseen. Taajuuden valinnalla on kuitenkin suuri vaikutus dynaamisen kärkivastuksen voittamiseen. (Viking, 2002, s.106.)

On kuitenkin huomattavissa, että suurempi taajuinen värähtely välittää vähemmän energiaa maarakenteessa ja siten korkeataajuustäryttimien ( $\geq 50$  Hz) aiheuttama maan värähtely vaimenee merkittävästi jo lähiympäristössä. (Arcelor Mittal Piling Handbook, 2008.) Tärytystaajuutta kasvattamalla voidaan siis vähentää paalutustyöstä aiheutuvia kuormituksia ympäröiville rakenteille.

#### 4.4.2 Amplitudi

Rodger ja Littlejohn (1980) ovat tutkimustensa perusteella ohjeistaneet, että ponttiseinää tai paalua maahan tärytettäessä amplitudin pitäisi olla vähintään 20–30 mm, mikäli maaperän kärkivastus on suuri. Pienemmillä kärkivastuksilla, kuten avoimilla putkipaaluilla, 5–20 mm riittää. Ohjearvoja suurelle tai pienelle kärkivastukselle ei ole annettu.

#### 4.4.3 Epäkeskomomentti ja epäkeskovoima

Epäkeskovoima on riippuvainen epäkeskomomentista, joten on mielekäästä tarkastella molempien parametrien vaikutusta paalun tunkeutumiseen samassa kappaleessa. Rodgerin ja Littlejohnin (1980) tekemissä kokeissa, joissa H-profiilin palkkeja tärytettiin kuivaan hiekkakerrokseen, huomattiin suora riippuvuus epäkeskomomentin ja tunkeutumisnopeuden välillä. Epäkeskomomentin kasvaessa tunkeutumisnopeus kasvoi. Wang (1994) sai myös samanlaisia tuloksia kokeissaan. Epäkeskomomentin kaksinkertaistuksessa tunkeutumisnopeus kasvoi noin 50 %, kun kaikki muut tärytysparametrit pidettiin samana. Myös koheesiomaassa epäkeskovoiman suuruudella on merkitystä. Massarschin (2000) mukaan epäkeskovoimalla on merkittävä vaikutus koheesiomaan leikkauslujuuden voittamiseen.

#### 4.5 Tunkeutumiseen vaikuttavat maakerrosten ominaisuudet

Tässä kappaleessa käydään läpi maakerrosten ominaisuuksia, jotka vaikuttavat tärytetävän paalun tunkeutumisnopeuteen. Aluksi esitellään kaikille maalajeille ominaisia parametreja, joilla on merkitystä paalun tunkeutumiselle, jonka jälkeen on eritelty miten täryttämisen dynaaminen vastus muodostuu kitka- ja koheesiomaassa. Seuraavien maakerrosten parametrien on havaittu vaikuttavan merkittävästi tunkeutumisnopeuteen:

- Maakerrosten suhteellinen tiiviys
- Vaakasuuntaiset tehokkaat jännitykset
- Hienoaineksen määrä
- Maakerrosten kyllästyneisyys vedellä (kitkamaassa)

Tunkeutumisnopeuden on huomattu olevan kääntäen verrannollinen maakerrosten suhteelliseen tiiviyteen. Mitä tiiviimpi maakerros on sitä enemmän se vastustaa paalun tunkeutumista. (Rodger ja Littlejohn, 1980; O'Neill ja Vipulanandan, 1989a.) Vaakasuuntaisilla tehokkailla jännityksillä on havaittu myös olevan suuri merkitys tärytetyn profiilin painumiseen. Jännitysten kasvaessa tunkeutumisnopeus pienenee. (Viking, 2002.)

Hienoaineksen määrän kasvaessa tunkeutumisnopeus pienenee. Eräiden tutkimusten mukaan hienoaineksen määrän ylittäessä maan tilavuudesta 12 %, tärytyslaitteiston käyttö ei ole järkevää ja kannattavaa. (Viking, 2002.) Maakerrosten rakeisuudella on myös merkitystä dynaamiseen vastukseen. Barkanin (1962) mukaan karkeampirakeisessa hiekkamaassa tärytetyn paalun dynaaminen vastus on suurempi, kuin hienompirakeisessa hiekkamaassa. Samanlaisen päätelmän ovat tehneet myös O'Neill ja Vipulanandan (1989a).

#### 4.5.1 Dynaaminen vastus kitkamaassa

Kitkamaassa dynaaminen vastus paalun tunkeutumiselle on täryttämällä pienempi kuin paalua lyömällä asentamalla. Ilmiötä on yritetty selittää erilaisilla hypoteeseilla. Eräs selitys on, että paalun ollessa jatkuvassa liikkeessä maan leikkauslujuus paalun vaipalla pienenee merkittävästi. Toinen merkitys jatkuvalla värähtelyliikkeellä on se, että se saa maan juoksettuneeseen tilaan paalun ympärillä, mikä helpottaa paalun tunkeutumista. (Massarsch, 2000.) Ilmiö johtuu siitä, että paalun oskilloiva liike nostaa huokosvedenpainetta paalun vaipan tuntumassa ja vähentää maan tehokkaita jännityksiä (Viking, 2002, s. 54). Tämä pätee ainakin löyhässä vedellä kyllästyneessä kitkamaassa. Toinen selitys on, että värähtelyliike saa aikaan seisovan aaltoliikkeen, jolla on suuri vaakasuuntainen komponentti. Tämän vaakasuuntaisen värähtelyliikkeen amplitudi kasvaa kitkakulman funktiona ja pienentää väliaikaisesti maanpainoa vaakasuunnassa. Edellä esitetyt ilmiöt voivat selittää sen miksi paalun asentaminen täryttämällä on tehokasta jopa tiiviissä kitkamaassa. (Massarsch, 2000.)

Tärytystaajuudella ei ole merkittävää vaikutusta vaippavastukseen kitkamaassa. Vaippavastuksen voittamiseen kitkamaassa ei tarvita myöskään suurta amplitudia. Amplitudin kasvattamisella, joka saadaan aikaan staattisen momentin nostamisella, on vain pieni merkitys vaippakitkan vähentymiseen. Kärkivastus riippuu kitkamaassa maan leikkauslujuudesta, joka mobilisoituu maarakenteen siirtymästä. (Massarsch, 2000.) Mikäli maakerroksen kärkivastukselle SPT-kairauksella saatu N-arvo on yli 50, on täryttämällä asentaminen jo hankalaa (Arcelor Mittal Piling Handbook, 2008.) Tiivistäen voidaan sanoa, että kitkamaassa saavutetaan paras tunkeutuvuus kasvattamalla paalun värähtelynopeutta suurella keskipakoisvoimalla. (Massarsch, 2000.)

Tärytetty paaluun saattaa muodostua tulppa kitkamaassa, joka hidastaa paalun kiihtyvyyttä ja pienentää värähtelytaajuutta. Bosscherin (1998) tutkimuksessa kaikkiin 12 avoimeen teräspalkkipaaluun, joiden halkaisija oli 168, 219 tai 273 mm muodostui tulppa. Yli 200 mm halkaisijaltaan olevissa paaluissa tulppa vaimensi paalun kärjen kiihtyvyyttä 5...25 % verrattaessa epäkeskopainojen kiihtyvyyteen. Myös värähtelytaajuus pieneni 25 Hz:stä 16 Hz:n osalla paaluista.

#### 4.5.2 Dynaaminen vastus koheesiomaassa

Koheesiomaassa vaippavastus pienenee vain vähän paalua tärytettäessä, poikkeuksena tässä on kuitenkin erityiset sensitiiviset savet, joissa leikkauslujuus pienenee rakenteen hajotessa mekaanisesti. Löyhissä savissa leikkauslujuus vähenee huokosvedenylipaineen takia, kun taas tiiviissä ylikonsolidoituneissa savikerroksissa saattaa leikkauslujuus kasvaa, koska maan laajentuessa aiheutuu hetkellistä huokosvedenalipainetta. Savien leikkauslujuus laskee yleensä tärytys syklien määrää lisätessä, mikä saattaa pienentää paalun vaippavastusta. (Massarsch, 2000.)

Vaakasuuntainen värähtelyliike on koheesiomaassa pientä, koska kitkakulma on suhteellisen pieni. Koheesiomaassa kitkan ollessa pieni ympäröivän maan ja paa-



lun vaipan välillä, vaakasuuntaisella liikkeellä on vähän merkitystä, sillä suljettu leikkaukslujuus on riippumaton normaalijännityksestä. (Massarsch, 2000.)

Värähtelytaajuus ja siten kuormitusnopeus vaikuttavat koheesiomaan leikkaukslujuuteen. Paalun vaippavastus ja kärkivastus kasvavat tärytystaajuuden kasvaessa. Siksi koheesiomaahan paalua tärytettäessä pitäisi tärytystaajuus pitää matalana. Kun halutaan minimoida tärytyksestä ympäristöön kohdistuvat vaikutukset on kuitenkin vältettävä työskentelemistä 15 Hz:n alueella. On havaittu, että tällä taajuudella maassa syntyy helpoiten haitallisia resonanssivaikutuksia. (Massarsch, 2000.)

Amplitudilla on suurin merkitys tärytyksen tehokkuudelle koheesiomaissa. Keskitiiviissä ja tiiviissä savikerroksissa vaaditaan suuri amplitudi, jotta vaippavastus ja kärkivastus voitetaan ja paalu saadaan tunkeutumaan syvemmälle. Paalun vaipan ja koheesiomaan toisiinsa kiinnittyminen vähenee kun siirtymäamplitudi ylittää kriittisen arvon, joka keskitiiviille ja tiiviille saviille on noin 10...30 mm. Koheesiomaahan paalua tehokkaasti asennettaessa, on saatava tärytettävään paalun värähtelyyn suuri amplitudi ja samalla täryttimen taajuuden on oltava matala. Tätä varten on tärytettävän dynaamisen massan oltava mahdollisimman pieni. (Massarsch, 2000.) Dynaamista massaa voidaan pienentää esimerkiksi käyttämällä lyhyempiä paaluja tai paaluja pienemmällä seinämävahvuudella. Näin on meneteltävä, jos ei haluta vaihtaa paaluniskijää kevyemmäksi.

## 5 TÄRYTETYN PAALUN KANTAVUUS

Täryttämällä asennetun paalun lopullisesta kantavuudesta ei ole usein varmuutta. Tunkeutuminen hidastuu loppusyvyyden lähestyessä, mutta tarkkaa tietoa kantavuuden varmistamiseen ei saada. Tärytyskalustolla, kuten lyöntikalustollakin paalu asennetaan niin tiukkaan, että sen tunkeutuminen pysähtyy. Tunkeutumisen pysähtyminen johtuu maakerroksen tiiviyydestä ja siitä, että kaluston kapasiteetti ei riitä ajamaan paalua syvemmälle. Tällöin ei saada kuitenkaan varmuutta siitä, kummasta tekijästä paalun tunkeutumisen pysähtyminen johtuu. Mikäli täryttimen kapasiteetti riittää, mutta paalu ei mene enää syvemmälle ollaan tukipaalun kantavuudessa varmalla puolella. Jos täryttimen kapasiteetti loppuu ja paalu pysähtyy, on tilanne epävarmempi. Kun ei saada varmuutta siitä, kummasta tapauksesta paalun pysähtyminen johtuu, on tunnettava myös tekijät mitkä vaikuttavat paalun tunkeutuvuuteen. Tällöin voidaan arvioida maaperän ja täryttimen ominaisuuksien perusteella, onko tärytetty paalu riittävän kantava tukipaalu.

### 5.1 Tärytetyn paalun kantavuuteen vaikuttavia tekijöitä

Aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu, että seuraavat parametrit ovat merkittäviä tärytetyn paalun kantavuuden arvioinnissa:

- Tärytyksen taajuus paalun päässä ja putkeniskijän täryttämättömässä painossa
- Paalun päähän välittyvä teho tärytyksen aikana
- Epäkeskopainojen kiihtyvyys

Näiden dynaamisten parametrien mittatulosten vaikutuksesta on havaittu, että tärytyksen taajuuden pienentyessä mitattu paalun kantavuus on ollut suurempi. (Bosscher et al., 1998.) Tämä johtuu siitä, että maan dynaamisen vastuksen kasvaessa taajuus pienenee ja paalun kantavuus kasvaa.

Samanlainen yhteys on havaittu myös tunkeutumisnopeuden ja arvioidun kantavuuden välillä. Tilanteessa, jossa paalun tunkeutumisen on huomattu hidastuvan, on mitattu paalun kantavuuden kasvavan. Epäkeskomomentilla on myös suoranainen merkitys paalun kantavuuteen. Suuremmalla täryttimen epäkeskomomentilla, jolla saadaan paaluun kohdistettua suurempi voima, saadaan paalulle suurempia kantavuuksia. (Bosscher et al., 1998.)

Lammertzin (2006) mukaan täryttäminen aiheuttaa paalun rakenteeseen pienempiä kuormituksia kuin lyömällä asentaminen. On kuitenkin mahdollista, että paalun ympärille tarttuvan täryvasaran puristus asennustilanteessa vahingoittaa ohutseinämäistä

teräspalkkipaalia puristaen poikkileikkausta hieman kasaan. Todennäköisesti tämä ei vaikuta paalun kantavuuteen, mutta kokeellista perustelua tälle väittämälle ei ole.

## 5.2 Kantavuuden määrittäminen laskennallisesti

Tärytetyn paalun kantavuuden määrittäminen voi olla hankalaa, sillä maan ja rakenteen yhteistoiminnan parametrit, jotka pätevät lyöntipaalutustystyössä, eivät samalla tavalla sovellu käytettäväksi tärytetyn paalun kantavuutta määritettäessä. Pääasiassa tämä johtuu maanrakenteen muodonmuutoksista paalun pinnan tuntumassa tärytyksen aikana. Tämä aiheuttaa maan leikkausmoduulin pienentymistä vähentäen merkittävästi kuorman välittymistä paalusta maahan. Maa ja tärytetty paalu käyttäytyvät enemmän toisistaan riippumattomina rakenteina kuin lyöntipaalutustystyössä. (Bosscher et al., 1998.)

Tällä hetkellä Suomessa ei ole hyväksyttyä menetelmää määrittää tärytetyn paalun kantavuutta ilman lyöntijärkälettä. Ainoa tapa on arvioida paalun geotekninen puristuskestävyys pohjatutkimusten perusteella. Tämäkään tapa ei ole välttämättä täysin luotettava tapa, sillä kuten edelläkin mainittiin, ei ole täyttä varmuutta missä määrin paalun asentaminen täryttämällä häiritsee sen ympärillä olevia maakerroksia vaikuttaen kärki- ja vaippavastukseen.

### 5.2.1 Geotekninen puristuskestävyys pohjatutkimusten perusteella

Täryttämällä asennetun paalun geotekninen puristuskestävyys on mahdollista arvioida pohjatutkimuksista saatujen parametrien avulla. Paalun geotekninen puristuskestävyyden mitoitusarvo  $R_{c;d}$  voidaan laskea seuraavalla lausekkeella (RIL 254-2011.):

$$R_{c;d} = R_{b;k}/\gamma_b + R_{s;k}/\gamma_s \quad (9)$$

missä

$R_{b;k}$	= paalun kärjen geoteknisen kestävyuden ominaisarvo
$R_{s;k}$	= paalun vaipan geoteknisen kestävyuden ominaisarvo
$\gamma_b$	= kärkikestävyuden osavarmuusluku
$\gamma_s$	= vaippakestävyuden osavarmuusluku

Käytettävät osavarmuusluvut löytyvät RIL:n Paalutusohje 2011:sta (RIL 254-2011: s. 63) Kärki- ja vaippakestävyuden ominaisarvot voidaan laskea seuraavilla lausekkeilla.

$$R_{b;k} = A_b \cdot q_{b;k} \quad (10)$$

$$R_{s;k} = \sum A_{s;i} \cdot q_{s;i;k} \quad (11)$$

missä

$A_b$	= paalun kärjen pinta-ala
$q_{b;k}$	= kärkikestävyys ominaisarvo
$A_{s;i}$	= paalun vaipan pinta-ala kerroksessa $i$
$q_{s;i;k}$	= vaippakitkan ominaisarvo kerroksessa $i$

Paalun kärkikestävyys ja vaippakitka voidaan laskea RIL:n Paalutusohjeen 2011 mukaisesti (RIL 254-2011 s.65-73). Rakennuskohteesta ei välttämättä aina ole tarpeeksi kattavia pohjatutkimuksia edellä mainittujen maaparametrien arviointiin. Urakoitsijan ei ole myöskään taloudellisesti tai aikataulusyistä perusteltua teettää lisää pohjatutkimuksia, joten maaparametreihin perustuva kantavuuskaava ei ole aina hyödynnettävissä.

## 5.2.2 Kantavuuden määrittäminen tärytysparametrien perusteella

Maailmalla on kehitetty kaavoja tärytetyn paalun kantavuuden määrittämiseen ilman loppulyöntejä. Kaavat perustuvat täryttimen käyttämään tehoon ja energiatasapainoon tai tärytysvoiman impulssiin. Näistä kolme ensimmäistä menetelmää ei ota huomioon kuitenkaan maakerrosten ominaisuuksia, kuten tiiviyyttä, tehokkaita jännityksiä ja raekokoa. Näillä edellä mainituilla parametreilla on ainakin vaikutusta lyömällä asennettujen paalujen kantavuuteen, joten on loogista että parametrien huomioiminen toisi lisää tarkkuutta myös täryttämällä asennettujen paalujen kantavuuden arviointiin. (O'Neill, et al. 1990.)

### 5.2.2.1 Snip-kaava

Snip-kaava on Neuvostoliitossa kokeellisesti määritetty kaava, jota on käytetty suurten paalujen kantavuuden arvioinnissa. Snip-kaava on esitetty seuraavassa lausekkeessa. (O'Neill, et al. 1990.)

$$Q_t = \lambda \left( \frac{25,5P}{A_0 f} + W_t \right) \quad (12)$$

missä

$Q_t$	= paalun staattinen kokonaiskantavuus [kN]
$P$	= täryttimen tärytykseen käyttämä teho [kW]
$A_0$	= täryttimen amplitudi [cm]
$f$	= täryttimen taajuus [Hz]
$W_t$	= täryttimen ja paalun kokonaismassa [kN]
$\lambda$	= kokeellisesti määritetty maakerrosten ominaisuuksista riippuva kerroin, kitkamaille käytetty arvoa 5

### 5.2.2.2 *Davissonin energiatasapainokaava tärytetyille paaluille*

Kaava on muunneltu versio Davissonin energiatasapainokaavasta, joka on kehitetty lyöntipaalujen kantavuuden arviointiin. Kaava perustuu energiatasapainoon: systeemiin tuotu energia = käytetty energia + energiahäviöt. Muunneltu Davissonin kaava on esitetty seuraavassa lausekkeessa.

$$Q_t = \frac{550P}{(v_p + f \cdot s_I)} \quad (13)$$

missä

$P$  = täryttimen tärytykseen käyttämä teho [hv]

$v_p$  = tunkeutumisnopeus [jalka/s]

$s_I$  = häviökerroin = painuma [jalka/tärytyssykli]

Mikäli tunkeutumisnopeus on suuri ja paalun kantavuus siten pieni, on kaavan osoittajaan lisättävä termi  $22000 \cdot v_p$ , jolla otetaan täryttimen liike-energia huomioon. Kärjestään suljetuille putkille, joita on tärytetty kitkamaahan resonoivilla täryttimillä (taajuus  $> 50$  Hz, Rausche, 2002), on häviökertoimelle käytetty tyypillisesti arvoja 0,0008...0,008 maakerrosten tiiviiden mukaan. Löyhälle maakerrokselle on käytetty pienempää arvoa ja tiiviimmälle vastaavasti isompaa arvoa. (O'Neill, et al. 1990.) Häviökerroin vaatii todennäköisesti kalibrointia käytettävän täryttimen mukaan. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi PDA-mittausta käyttämällä.

### 5.2.2.3 *Schmidin impulssikaava*

Tämä laskukaava perustuu paalun kärjen impulssiin tärytyksen aikana. Kaava on tarkoitettu erityisesti resonoimattomille matalataajuustäryttimille. Paalu ja tärytin ajatellaan yhtenäisenä vapaana kappaleena, jolloin yhden tärytyssyklin impulssille saadaan seuraava lauseke.

$$\frac{W_v + W_p}{2\pi f} = \int_0^{T_c} Q_t dt = \alpha \cdot Q_t \cdot T_c \quad (14)$$

missä

$W_v + W_p$  = täryttimen massa + paalun massa [kN]

$\alpha$  = kerroin, yleensä 0,67

$T_c$  = maan ja paalun kärjen välinen kontaktin kesto yhden syklin aikana [s]

Maan ja paalun kärjen kosketuksen ajanjakson  $T_c$  määrittämiseen on selvitettävä tunkeutumiseen vaikuttava paalun pienin kiihtyvyys kenttäkokeilla. Paalun tunkeutumisen

pysähtymistä edeltävää kiihtyvyyttä merkitään suureella  $a_e$ , jolloin  $T_c$  saadaan laskettua seuraavalla lausekkeella. (O'Neill, et al. 1990.)

$$T_c = \left( \frac{2 \cdot v_p}{f \cdot a_e} \right)^{0,5} \quad (15)$$

jolloin saadaan kantavuudelle lauseke

$$Q_t = \frac{\alpha (W_v + W_p)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left( \frac{2 \cdot v_p}{f \cdot a_e} \right)} \quad (16)$$

#### 5.2.2.4 O'Neillin tehonvälityslauseke (Power Transfer expression)

O'Neill, Vipulanandan ja Wong (1999) ovat kehittäneet tärytetyn paalun kantavuuden määrittämiseen kaavan, joka perustuu täryttimen paalun päähän välittämään tehoon. Kaavassa huomioidaan maakerrosten parametrit  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  ja  $\beta_3$ , jotka ovat määritetty regressiolla laboratoriokokeista saaduista tuloksista. Näillä parametreilla ei ole yksikköä.

$$Q_t = \frac{0,050 \cdot P_h}{v_p \cdot [\beta_1(\sigma'_h) \cdot \beta_2(D) \cdot \beta_3(d_{10})]} \quad (17)$$

missä

- $P_h$  = keskimääräinen paalun päähän välitetty teho [W]
- $\beta_1$  = tehokkaan vaakasuoran maanpaineen huomioiva kerroin [psi]  
 $= -0,486 + 0,0743\sigma'_h$ ,  $10 \text{ psi (69 kPa)} \leq \sigma'_h \leq 20 \text{ psi (138 kPa)}$
- $\beta_2$  = maakerroksen tiiveysasteen huomioiva kerroin  
 $= 1,96D - 1,11$ ,  $65 \% \leq D \leq 90 \%$
- $\beta_3$  = 10 % läpäisyä vastaava raekoko [mm]  
 $= 1,228 - 0,19d_{10}$ ,  $0,2 \text{ mm} \leq d_{10} \leq 1,2 \text{ mm}$

Kaava on kokeellisesti määritetty ja soveltuu käytettäväksi vain maaperässä, jonka parametrit on edellä esitettyjen raja-arvojen piirissä. Kokeet tehtiin vedellä kyllästetyssä hiekka-altaassa, jonka olosuhteet vastasivat hieman ylikonsolidoitunutta hiekkamaakerrosta. (O'Neill, et al. 1990.)

### 5.3 Kantavuuden määrittäminen GRLWEAP-ohjelmistolla

GRLWEAP on Pile Dynamics -yhtiön kehittämä yksiulotteinen aaltoliiketyökalu perustuva ohjelma, joka simuloi paalun käyttäytymistä asennustilanteessa. Paaluja voidaan ohjelmassa asentaa lyönti- ja tärytyskalustolla. Ohjelma arvioi paaluun kohdistuvat jännitykset, asennuskaluston suorituskyvyn sekä yhteyden paalun kantavuuden ja sen isku-kohtaisen painuman välillä. Tärytyskalustolla ohjelma mallintaa painuman aikayksikköä kohden. Ohjelma arvioi myös paalun asennukseen kuluvan ajan, jolloin voidaan arvioi-

da onko kaluston käyttäminen järkevää tietyissä maaperäolosuhteissa. (GRLWEAP Procedures and Models, 2005.)

Täryttävän putkeniskijän GRLWEAP-ohjelma mallintaa kahtena erillisenä massana, jotka on kiinnitetty toisiinsa jousella ja iskunvaimentimella, joille voidaan määrittää jousivakio ja vaimennusparametrit. Ylempi massa eristää tärytyksen putkeniskijän ripustuksista ja lisää alaspäin painavaa voimaa. Ylempään massa voidaan vielä lisätä esimerkiksi kaivinkoneen puomin kohdistama painatusvoima. Alemmassa massassa on sisällä epäkeskopainot, joiden mitan ja massan voi ohjelmassa määrittää. Näillä tekijöillä ohjelma mallintaa jaksollisen epäkeskovoiman alempaan massa, joka sitten kohdistetaan paaluun. Putkeniskijälle annetaan teho ja taajuus sekä hyötysuhde, jolla ohjelma pyrkii laitetta asennustyön aikana käyttämään. Teho riippuu käytetystä taajuudesta ja taajuus taas mallinnettujen maakerrosten dynaamisesta vastuksesta. (GRLWEAP Procedures and Models, 2005.)

GRLWEAP-ohjelma mallintaa maakerrokset E.A.L. Smithin 1950-luvulla kehittämän maamallin kaltaisesti, jossa maa koostuu osista, joissa on jousi ja iskunvaimennin. Ohjelmalle syötetään maan vaimennus- ja tärähdyskertoimet, joilla mallinnetaan miten maakerrokset käyttäytyvät paalutustyön aikaansaaman aaltoliikkeen vaikutuksesta. Maakerrosten kärki- ja vaippavastus mallinnetaan yksinkertaisimmillaan SPT-kairauksella saatavan N-luvun ja maan tilavuuspainon perusteella. (GRLWEAP Procedures and Models, 2005.)

GRLWEAP-ohjelmalla voi määrittää paalun kantavuuden tunkeutumisnopeuden (mm/s) perusteella. Ohjelmaan syötetään ensimmäinen oletettu loppukantavuusarvo, jonka se jakaa paalun vaipalle ja kärjelle käyttäjän antaman vaippa-/kärkivastussuhteen perusteella. Tämän jälkeen ohjelma laskee paalua tärytettäessä paalun tunkeutumisnopeuden. Seuraavaksi ohjelma valitsee seuraavan oletetun loppukantavuuden ja jakaa sen taas samalla tavalla pitkin paalua. Ohjelmalle voidaan antaa yhtä analyysiä varten kymmenen laskettavaa loppukantavuutta. Kun kaikki loppukantavuudet on käyty läpi, ohjelma tulostaa näytölle taulukon, jossa on esitetty jokaista loppukantavuutta vastaavat tunkeutumisnopeudet. (GRLWEAP Procedures and Models, 2005.)

## 5.4 Kantavuuden määrittäminen PDA-mittauksella

PDA-mittaus on dynaaminen koekuormitus, jossa mitataan lyöntilaitteen aikaansaaman iskuaallon kiihtyvyyttä ja paalun venymää. PDA-mittauksella voidaan myös tutkia paalun ehjyyttä, paaluun siirtynyttä energiaa, sekä paaluun kohdistuvia lyöntijännityksiä. Näiden avulla saadaan määritettyä paalun geotekninen murtokestävyys. Yleensä lyöntilaitteena käytetään samaa paalutuskonetta, jolla paalutkin asennetaan. (Hakanen, 2008.)

Paaluun kiinnitetään tyypillisesti kaksi kiihtyvyyss- ja venymäliuskaa, joilla mitataan paaluun aiheutuvaa iskuaaltoa. Anturit kiinnitetään paalun vastakkaisille puolille pulteilla, joille porataan paalun kylkeen reiät. Anturit täytyy kiinnittää paaluun tarkasti pituussuuntaisesti ja lujasti kiinni, jotta mittaustulos on luotettava ja selkeä. Mitta-

usanturit kytketään kaapeleilla kiinni PDA-mittausta varten rakennettuun kannettavaan mittautietokoneeseen. Mittausten dataa voidaan tarkastella ja käsitellä PDA-tietokoneen analyysiohjelmalla. (Hakanen, 2008.)

Iskuaaltoteoriaa paaluttamiseen sovellettaessa tarkastellaan ainoastaan pituussuuntaisia jännityksiä ja muodonmuutoksia perustuen Newtonin II ja Hooken lakiin. Paaluun kohdistunut isku aiheuttaa paalun yläpäähän jännityksen, joka aiheuttaa ohuen kerroksen kokoonpuristuman. Tämä hetkellinen muodonmuutos aiheuttaa venymän seuraavassa kerroksessa, jolloin jännitys siirtyy taas seuraavaan kerrokseen. Iskuaalto etenee näin paalun läpi hetkittäisinä puristus- ja vetoaaltoina.

Geoteknistä murtokestävyyttä arvioidaan Yhdysvaltojen Case Institute of Technology:ssa kehitetyllä CASE-menetelmällä, joka perustuu iskuaaltoteorian peruskaavan suljettuun muotoon. Menetelmässä oletetaan paalu lineaarisesti elastiseksi ja poikkileikkaukseltaan vakioksi. Tällöin kokonaislyöntivastus RTL, tilanteessa jossa maan vaimentavaa vaikutusta ei huomioida, saadaan lausekkeesta 18 (Likins, 1988, Hakanen, 2008.)

$$RTL = \frac{F(t_1) + F(t_2)}{2} + Z \frac{v(t_1) - v(t_2)}{2} \quad (18)$$

missä

$F$	= voima mittauspisteessä [N]
$v$	= partikkelinopeus mittauspisteessä [m/s]
$t_1$	= alaspäin kulkevan iskuaallon mittausajankohta
$t_2$	= paalun kärjestä palaavan iskuaallon mittausajankohta ( $t_1 + 2L_c/c$ )
$L_c$	= mittauspisteen etäisyys paalun kärjestä [m]

Staattista vastusta määritettäessä on kokonaislyöntivastuksesta vähennettävä paalun kärjen alla olevan maakerroksen dynaaminen vaimennus. Vastuksen oletetaan olevan suoraan verrannollinen paalun kärjen nopeuteen. Paalun kärjen nopeus voidaan arvioida paalun päästä mitatun voiman ja partikkelinopeuden avulla. Staattinen vastus saadaan seuraavalla lausekkeella.

$$R_s = RTL - J_c[Z \cdot v(t_1) + F(t_1) - RTL] \quad (19)$$

missä

$J_c$	= CASE-vaimennuskerroin
-------	-------------------------

CASE-vaimennuskertoimen on oletettu käänteisesti verrannollinen paalun kärjen alla olevan maakerroksen raekokoon. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 3) on esitetty ohjearvoja vaimennuskertoimelle  $J_c$  maalajin mukaan (Likins, 1988.)



**Taulukko 3.** CASE-vaimennuskertoimen arvoja eri maalajeille.

Maalaji paalun kärjen alla	Vaimennuskerroin $J_c$
Hiekka	0,10...0,15
Silttinen hiekka	0,15...0,25
Siltti	0,25...0,40
Silttinen savi	0,40...0,70
Savi	0,70...1,00

Paalun kärjen ollessa tiiviissä ja hyvin kantavassa maakerroksessa kärkivastuksen mobilisoituminen vaatii PDA-mittauksessa verrattain suuren siirtymän. Tällöin geoteknisen murtokestävyyden arviointiin soveltuu parhaiten RMX-estimaatti (Maximum Resistance Method). Arvioitaessa geoteknistä murtokestävyyttä RMX-estimaatilla, valitaan sellainen hetki  $t_I$ , jotta saadaan lausekkeelle 19 suurin arvo (Hakanen, 2008.) Yleensä kaikkien tukipaalujen kantavuus määritetään RMX-estimaattia käyttäen.

## 6 KOEPAALUTUKSET

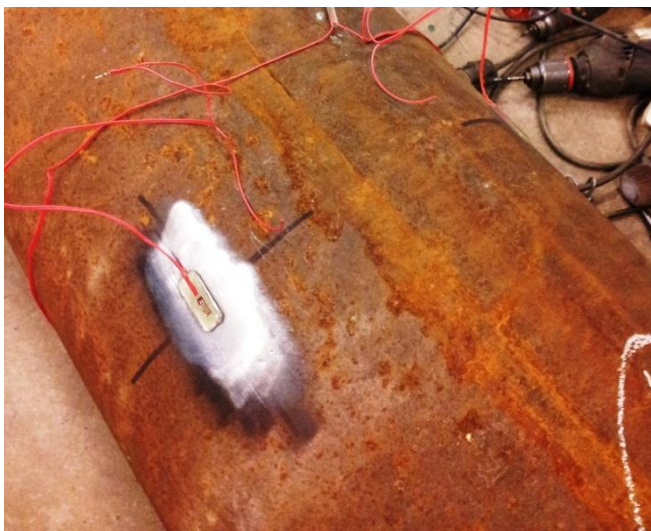
### 6.1 Käytettävä koelaitteisto

Tärytettävän paalun tunkeutuvuutta ja kantavuutta kuvaavia parametreja pyritään seuraamaan ja tallentamaan jälkianalysointia varten seuraavanlaisella laitteistolla. Laitteisto kootaan Tampereen teknillisen yliopiston rakennushallissa.

#### 6.1.1 Venymäliuskat

Tärytettäviin paaluihin asennetaan venymäliuskat voiman ja taajuuden analysointiin. Venymäliuskat asennetaan neljä metriä pitkiin paaluelementteihin, jotka hitsataan kiinni varsinaisiin paaluihin vasta lopputärytysvaiheessa, jotta saadaan paalun loppukantavuudesta kertovat muuttujat tallennettua. Venymäliuska ei saada mitattua suoraan taajuutta, mutta tarkastelemalla voiman suunnan muuttumisnopeutta saadaan taajuus määritettyä.

Jokaiseen paaluun asennetaan neljä Kyowa KFW-5-120-C1-11L1M2R venymäliuskaa paalun ympärille symmetrisesti, jolloin liuskat ovat paalun reunan vastakkaisilla sivuilla. Järjestelyllä saadaan mahdollisen taivutuksen vaikutus mittaukseen eliminoitua. Kuva 7 on venymäliuska liimattuna paalun pintaan. Venymäliuskat liitetään sarjaan ja niistä mitataan muodonmuutoksen keskiarvoa. Venymäliuskat mittaavat jännitteen muutosta virtapiirissä, jännite-ero muutetaan paalun aksiaalisesti kuormitukseksi vakiokertoimen avulla. Aikakuvaajasta voidaan erotella jaksollinen dynaaminen voima ja jaksollisen voiman nolla-asemaa siirtävä staattinen painatusvoima.



**Kuva 7.** Venymäliuska liimattuna paalun pintaan.

Venymäliuskoilta saatava signaali vahvistetaan ja välitetään tietokoneelle Tampereen teknillisellä yliopistolla rakennetulla venymäliuskamittauslaitteistolla. Laitteiston loggari muuttaa liuskoilta saatavan signaalin tietokoneen ymmärtämään muotoon. Signaalia seurataan, tallennetaan ja käsitellään tietokoneella DASYLabs 9 -ohjelmalla.

### **6.1.2 Videokamera**

Tärytettävien paaluelementtien kylkeen kiinnitetään pulteilla metrin pituiset mittaviivaimet millimetrin asteikolla. Tärytettävän paalun tunkeutumisnopeus voidaan määrittää kuvaamalla mitta-asteikkoa tärytyksen aikana videokameralla, jolloin videokuvasta voidaan jälkeinpäin mitta-asteikon liikettä tarkkailemalla laskea tunkeutumisnopeus (mm/s). Videokameralla voidaan kuvata vaaituskojeen läpi, mikäli videokameran tarkennuksen kantama ei riitä. Videokuvauksesta on myös hyötyä kokeen tapahtumien dokumentoinnissa jälkeinpäin. Paalun kokonaispainuma lopputärytyksen aikana mitataan vaaittamalla mittaviivaimen korkeusasema ennen ja jälkeen lopputärytyksen.

### **6.1.3 Mikrofoni**

Toinen vaihtoehto määrittää taajuus on nauhoittaa mikrofoniin tärytyksen ääntä. Äänen aaltomuodosta voidaan soveltuvalla ohjelmalla jälkeinpäin määrittää tärytyksen taajuus riittävällä tarkkuudella. Käyttämällä venymäliuskojen lisäksi mikrofonia tärytyksen taajuuden määrittämisessä saadaan taajuus luotettavammin tallennettua. Mikrofonina ja tallennuslaitteena käytetään Zoom H2N -digitaalitalenninta ja äänenkäsittelyohjelmistona Steinberg Wavelab LE:a.

### **6.1.4 GRLWEAP-ohjelma ja PDA-mittaus**

Paalun tärytystä ja täryttimen parametreja mallinnetaan GRLWEAP-ohjelmalla mahdollisimman tarkasti koekohteen olosuhteiden mukaisesti. Näin voidaan jälkeinpäin arvioida mallinnetun tapauksen luotettavuutta vertaamalla mitattuja parametreja mallilla määritettyihin arvoihin. Tällöin saadaan arvokasta informaatiota miten eri maakerrosten ominaisuudet tulee GRLWEAP-ohjelmalla mallintaa, jotta päästään totuudenmukaisiin tuloksiin.

Työmaalla suurin osa paaluista on asennettu lyömällä, joten lyömällä ja täryttämällä asennettujen paalujen kantavuutta voidaan luontevasti vertailla tekemällä PDA-mittaukset molempien asennustapojen paaluille samoissa pohjaolosuhteissa. Näin saadaan varmistettua täryttämällä asennetun paalun kantavuuden riittävyys. Kokeissa tehtävissä PDA-mittauksissa 2 tonnin paino pudotetaan paalun päähän 1 metrin korkeudesta laitteiston toimivuuden varmistamiseksi, jonka jälkeen paino pudotetaan kahdesti 1,6 metrin korkeudesta, jonka jälkeen tehdään 10 lyönnin sarja, jossa paino pudotetaan 1 metrin korkeudesta. Paalun loppukantavuus määritetään kahdesta 1,6 metrin pudotuksesta.

### 6.1.5 Koejärjestelyissä käytettävä putkeniskijä ja paalut

Kokeissa käytetään urakoitsijan työtelineiden perustamisessa käyttämää teräsputkipaalu, jonka halkaisija on 323,9 mm ja seinämävahvuus 5 mm. Paalujen teräslaatu on S355J2H. Tärytyslaitteistona käytetään Movax SP60W-putkeniskijää, jossa on putki-profiilin ympärille tarttuvat leuat. Alla on esitetty Movax SP60W-putkeniskijän tutkimuksen kannalta oleelliset parametrit (Movax Oy, 2012):

- Suurin taajuus,  $f_d = 3000 \text{ rpm} = 50 \text{ Hz}$
- Suurin epäkeskovoima,  $F_e = 600 \text{ kN}$
- Suurin epäkeskomomentti,  $M_e = 61 \text{ kNm}$
- Amplitudi ilman paalua,  $s_d = 9 \text{ mm}$
- Täryttävän osan massa = 1450 kg
- Ottoteho,  $P = 70 \text{ kW}$

Putkeniskijän kiinnityksen kumieristeiden läpi voidaan välittää enintään 5000 kg nosto / painatus. Laitteisto rajoittaa itse painatus- ja nostovoimaa. Paaluun saatava suurin nostovoima on 3600 kg ja suurin painatusvoima  $1450 + 5000 = 6450 \text{ kg}$ . Sekä nosto- että painatusvoiman kanssa vaikuttaa myös epäkeskovoima. Urakoitsijana putkien täryttämässä käytetään Maanrakennusliike Arno Ruusulehti Oy:tä.

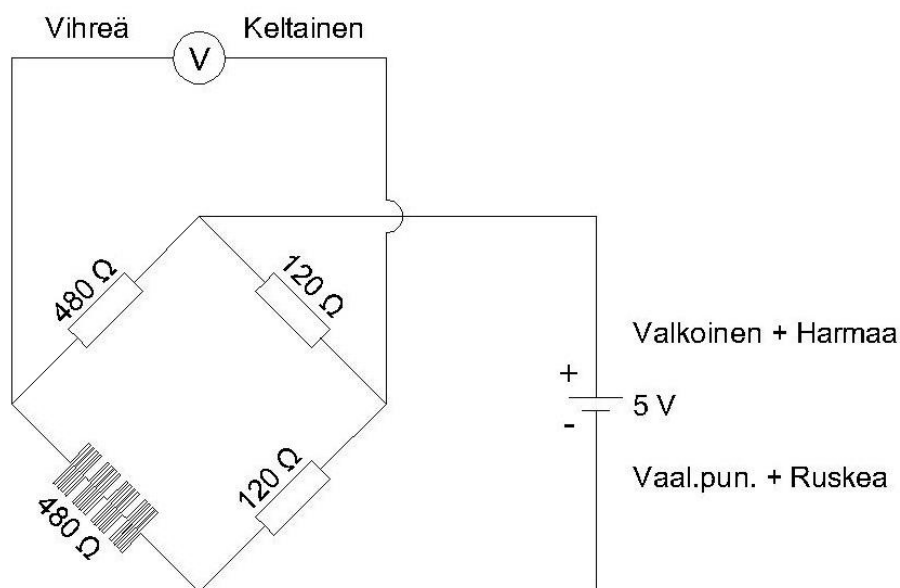
### 6.1.6 Mittauslaitteiston valmistaminen

Kokeissa käytettävät teräsputkipaalut saatiin katkaisemalla kaksi 12 metriä pitkää paalu kolmeen osaan. Paalut ovat uusia ja käyttämättömiä. Neljä metriä pitkät paalut numeroitiin juoksevasti yhdestä kuuteen.

#### 6.1.6.1 Venymäliuskojen asentaminen

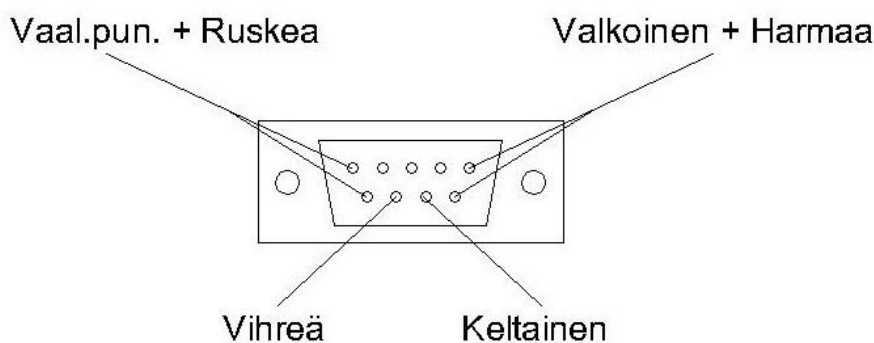
Aluksi merkittiin paikat venymäliuskoille symmetrisesti neljään kohtaan teräsputkipaalu ympärille. Paaluihin porattiin kierteinen reikä teräksistä vedonpoistolenkkiä varten. Venymäliuskojen kohdista poistettiin ruoste paalun pinnasta riittäväältä alueelta kulmahiomakoneella. Alueet hiottiin sileiksi hiomakoneella ja viimeisteltiin hienolla hiomapaperilla (karkeus 600 C).

Hiotut alueet puhdistettiin asetonilla, ja puhdistuksen jälkeen venymäliuskat liimattiin välittömästi Kyowan omalla EP-180-liimalla painaen liuskaa tasaisesti paalun pintaa vasten noin minuutin ajan.



**Kuva 8.** Virtapiirisilta, sarjaan liitetyt venymäliuskat vasemmassa alareunassa.

Kun kaikki liuskat oli liimattu paikalleen, liitettiin liuskat sarjaan juottamalla ne yhteen ja kiinnittämällä vedonpoistoon. Yhden liuskan vastus on  $120\ \Omega$ . Sarjassa olevat liuskat liitettiin siltaan  $480\ \Omega$  ja  $120\ \Omega$ :n vastusten kanssa. Silta on esitetty Kuva 8. Sillan johdot yhdistettiin 9-nastaiseen D-liitimeen, joka voidaan myöhemmin liittää venymäliuska-mittauslaitteistoon. Liitin on esitetty Kuva 9.



**Kuva 9.** 9-nastainen D-liitin ja venymäliuskasillan värikoodaattujen johtojen liittäminen.

#### 6.1.6.2 Mittaviivaimien asentaminen

Kuuteen yhden metrin teräksiseen mittaviivaimeen porattiin  $8,5\ \text{mm}$  reikä toiseen päähän. Viivaimen päässä oli jo toinen samankokoinen reikä valmiina. Jokaiseen paaluun porattiin kaksi M8 reikää kierteillä pulttia varten. Viivaimen alapintaan levitettiin SIKA:n Sikabond saumausliimaa ja kiinnitettiin M8-pulteilla paalun kylkeen noin  $1,5$  metrin päähän paalun alapäästä (Kuva 10).



**Kuva 10.** Teräksinen mittaviivain kiinnitettynä paalun pintaan.

#### **6.1.6.3 Mittauslaitteiston testaus ja kalibrointi**

Kytcentöjen, juotosten ja venymäliuskojen toimivuuden testaamiseksi jokainen paalu koepuristettiin hydraulitunkilla. Paalun läpi pujotettiin pitkä DYWIDAG-tanko, joka kiristettiin koko paalun päätä peittävää teräslevyä vasten aluslevyllä ja korkealla mutterilla molemmista päistään. Toiseen päähän mutterin alle laitettiin hydraulitunkki, joka tarttui DYWIDAG-tangon ympärille ja tunkin painetta nostettaessa kohdistui tankoon vetojännitystä ja samalla teräsputkipaaluun puristusta. Paalun puristusta seurattiin voima-anturilla ja samalla mitattiin jännitteen muutosta venymäliuskasillassa.

Jälkeenpäin voitiin laskea voiman aiheuttama muodonmuutos paalussa ja verrata sitä jännitteen muutokseen. Kun jännitteen muutos muutettiin muodonmuutokseksi venymäliuskavalmistaja Kyowan esittämän kaavan mukaan, voitiin huomata, että jokaisen paalun venymäliuskat vastasivat oikealla tavalla aksiaaliseen puristukseen. Testauksessa huomattiin, että paalun numero 4 venymäliuskoista yksi tai useampi saattaa olla huonosti kiinni, sillä mittaus reagoi kuormituksen muutoksiin hieman jäljessä, eikä niin tarkasti kuin muiden paalujen mittaukset. Testauksessa kävi ilmi myös, että venymäliuskat reagoivat todella herkästi lämpötilamuutoksiin.

Kokeissa käytettävä mittauslaitteisto on rakennettu Tampereen teknillisellä yliopistolla venymäliuskojen ja kiihtyvyyssantureiden syöttämän tiedon tallentamiseen. Laitteiston sisältämä loggeri muuttaa tiedon tietokoneen ymmärtämään muotoon, jolla tietoa käsitellään DASYLab-ohjelmalla. Venymäliuskat mittaavat jännitettä virtapiirisillassa, joten mittaussignaali on kerrottava DASYLab:ssa vakiokertoimella, jotta mitattu jännitteen arvo ja sen muutos saadaan vastaamaan paaluun kohdistuvaa aksiaalista kuormitusta. Vakiokerroin voitiin kyseiselle loggerille määrittää samalla tavalla kuin testattiin venymäliuskojen toimintaa hydraulitunkeilla. Tässä tilanteessa

DASYLab:ssa näkyvä jännite asetettiin vakiokertoimen avulla vastaamaan hydraulitunkin ja paalun pään välissä olevan voima-anturin arvoa. Tällöin DASYLab:ssa näkyy paaluun kohdistuva aksiaalinen kuormitus (kN).

## 6.2 Koekohteet

### 6.2.1 Kirjastosilta, Turku

Rakennusurakkaan kuuluu kevyen liikenteen sillan rakentaminen Turussa Aurajoen yli sekä 170 metriä vanhan rantamuurin korjausta Aurajoen itärannalla. Silta yhdistää Retiginrinteen ja Kauppiaskadun kevyenliikenteen väylät. Silta on noin 70 metriä pitkä teräsbetoninen yksiaukkoinen silta, jossa on kaksi kevyen liikenteen kaistaa. Ennen sillan rakentamista ja rantamuurien korjaamista rakennetaan sillan muotin tukeva teline ja työsilta sillan ja rantamuurien viereen.



**Kuva 11.** Kirjastosillan työtelinepaalutusta.

Telineet ja työsilta perustetaan teräspalkkipaalujen varaan, joita hyödynnetään tässä tutkimuksessa. Koepaalutukset pyritään tekemään kairauspisteiden kohdalla, jotta maaperäolosuhteiden vaikutuksesta täytetyn paalun kantavuuteen saataisiin mahdollisimman selkeä kuva. Kuva 11 on Turun Kirjastosilta työtelinepaalutusvaiheessa.

#### 6.2.1.1 Pohjasuhdekuvaus

Kirjastosillan alla maakerrokset muodostuvat ylhäältä alaspäin päällimmäisestä täyttökerroksesta, paksusta savikerroksesta ja moreenikerroksesta kalliopohjan päällä. Silta- paikan itäpäässä kalliopohja on merkittävästi korkeammalla kuin länsipäässä. Itäpäässä kalliopohja on -7 m tasossa, josta se laskee loivasti länteen päin. Noin 10 metrin päästä rantamuurista kallio alkaa laskea jyrkemmin noin 1:2-kaltevuudella. Läntisen maatuen

alla kalliopinnan lasku tasoittuu, jolloin pinta on -25 metrin tasossa. Savi- ja moreenikerrosten paksuudet mukailevat kalliopinnan länteen päin laskevaa linjaa.

Moreenikerros on itäpäässä noin metrin paksuinen kallion päällä. Siltapaikan keskikohdalla moreenikerroksen paksuus alkaa kasvaa ja läntisen maatuen alla kerroksen paksuus on noin 5 metriä. Savikerroksen paksuus kasvaa idästä länteen päin. Itäisen maatuen alla savikerroksen ylä- ja alapinta on välillä +2,5...-6 m ja läntisen maatuen alla +1...-17 m. Itä- ja länsirannoilla saven päällä olevan täyttökerroksen paksuus on 2..2,5 metriä.

Itäisen korjattavan rantamuurin tuntumassa maalajikerrokset noudattavat edellä esiteltyjä pohjasuhteita. Siltapaikan eteläpuolella kallionpinta on itäisen rantamuurin tuntumassa pääasiassa -10 m syvyydessä. Sillasta pohjoiseen päin kallionpinta nousee ja noin 20 metrin päässä sillasta kallionpinta on -7 m korkeusasemassa ja alkaa laskea jopa -16 metriin asti. Kallion päällä on noin metrin kerros moreenia, jonka päällä on savikerros, jonka paksuus vaihtelee 7...10 metriin. Saven päällä on noin 5 metrin täyttökerros koko rantamuurin matkalla.

Maalajikerrosten rajat on määritetty heijarikairauksella ja kallionpinnan korkeusasema porakonekairauksella. Itäisen rantamuurin päältä on tehty puristinheijarikairauksia, joilla on saatu saven kärkivastukselle arvoja 1..2 MPa, moreenille 14...66 MPa. Moreenin kärkivastukset on laskettu heijarivaiheen lyöntien määrästä ( $N_{20}$ ). Kirjastosillan pohjatutkimuspiirustukset ovat liitteessä 1.

### **6.2.2 Kälviänjoen ratasilta, Kälviä**

Siltapaikalla Seinäjoki–Oulu-rata ylittää Kälviänjoen. Siltapaikalle tehdään kaksi samantyyppistä siltaa. Toisen sillan paikalta puretaan pois vanha teräksinen ratasilta. Silat sijaitsevat radan kilometriluvulla 568+680. Rata kallistaa sillan kohdalla länteen 0,24 % ja on sillan kohdalla vaakakaarella  $R = 1170$  m. Alikulkevan joen vedenpinnan korkeus  $W$  on n. +9,68 ja korkeimmassa tilanteessa kevättulvien aikaan  $HW$  on n. +11,70. Silat ovat tyypiltään teräsbetonisia kaukaloulokelaattasiltoja. Jännemitat ovat sillan suunnassa  $(2,0) + 22,0 + (2,0)$  m ja hyödyllinen leveys  $7,4 + 7,4$  m. Kannet tukeutuvat molemmista päistään porapaaluille kumipesälaakerien välityksellä. Siltojen molempiin päihin rakennetaan 5 metrin siirtymälaatat ja paalulaatat. Silat rakennetaan paikalla valaen.





**Kuva 12.** Kälviänjoen ratasillan työtelinepaalutusta. Taustalla näkyy vanha teräksinen ratasilta joka puretaan ennen toisen uuden sillan rakentamista.

Telineet ja työsilta perustetaan teräsputkipaalujen varaan, joita hyödynnetään tässä tutkimuksessa. Koepaalutukset tehdään aikaisemmin suoritettujen pohjatutkimusten alueella, jotta maaperäolosuhteiden vaikutuksesta tärytetyn paalun kantavuuteen ja asennettavuuteen saataisiin mahdollisimman selkeä kuva. Kuvassa Kuva 12 on Kälviänjoen ratasilta työtelinepaalutusvaiheessa.

#### **6.2.2.1 Pohjasuhdekuvaus**

Siltapaikalla maanpinta jokiuoman törmillä on noin tasolla +11. Nykyisen ratapenkeen korkeustaso on noin +13. Ohuen täyttökerroksen alla on 2...5 m vahva keskitiivis silttikerros, jonka vesipitoisuus on luokkaa 40...50 %. Tätä seuraa keskitiiviistä tiiviiseen vaihteleva kivinen moreenikerros. Kallionpinnan taso vaihtelee välillä -1...+4. Vedenpinnan korkeus on ollut uomassa mittaushetkellä 2009 noin +9,3 m. Vedenpinta täyttekerroksissa seuraa joen pinnan korkeusvaihteluja. Maaperä on routivaa. Nykyisen purettavan sillan kiviset maatukirakenteet arinoineen vaikeuttavat uusien siltojen paalutustöitä, mutta eivät vaikuta työsilan paaluttamiseen. Joen molemmilla rannoilla on tehty puristinheijarikairauksia, joilla on saatu siltin kärkivastukselle arvoja 1..8 MPa, moreenille 24...47 MPa. Moreenin kärkivastukset on laskettu heijarivaiheen lyöntien määrästä ( $N_{20}$ ). Kälviänjoen ratasillan pohjatutkimuspiirustukset ovat liitteessä 2.

## 6.3 Kokeiden suoritus

### 6.3.1 Kirjastosilta, Turku

Koepaalutukset Turussa suoritettiin 16.–17.1.2013. Kokeissa lyötiin kaksi ja tärytettiin kuusi testipaalua. Taulukossa 4 ja 5 on esitetty koepaalujen asennus yksityiskohtaisesti. Kokeiden kulku on selostettu aikajärjestyksessä seuraavassa luettelossa:

1. Kokeet aloitettiin lyömällä kaksi paalua työtelineen viereen, Aurajoen läntisen rantamuurin tuntumaan rakennettavan sillan Kauppiaskadun päähän (pohjatutkimukset, leikkaus 2). Ensimmäinen lyöntipaaluista pysähtyi ylempänä kuin läheisyyteen aikaisemmin lyödyt paalut. Tämän viereen lyötiin uusi paalu, joka meni oletettuun syvyyteen ja todennäköisesti tiiviiseen kerrokseen. Tämän paalun kantavuus määritettiin PDA-mittauksella verrokiksi täryttämällä asennettaville paaluille. Paalun kantavuudeksi saatiin 1100 kN ( $F_{RMX}$ ).
2. Tärytettiin kaksi paalua Aboa Vetuksen edessä olevan korjattavan rantamuurin eteen (pohjatutkimukset, leikkaus 5). Paalut tärytettiin paalun ympäriltä kiinni pitäen. Ensimmäinen pysähtyi tiiviiseen kerrokseen ennen kuin paaluun ehdittiin hitsata venymäliuskallista lyhyttä paalua. Seuraava tärytettiin syvyyteen, jossa tunkeutumismisnopeus hidastui huomattavasti, ja paalun päähän hitsattiin venymäliuskallinen paaluelementti nro 3. Lopputärytys tehtiin paalun ympäriltä kiinni pitäen. Paalun painumisen loppuessa paalulle tehtiin PDA-mittaus. Ensimmäisellä lyönnillä kantavuudeksi saatiin 256 kN, joka on varsin pieni arvo. Lisäksi paalu painui ensimmäisellä lyönnillä 70 mm. Tämä saattoi johtua täryvasaran huolimattomasta irrotuksesta, jossa paalu hieman liikahti ylöspäin.
3. Seuraava paalu tärytettiin kahden lyömällä asennetun paalun viereen Aurajoen läntisen rantamuurin eteen. Paalu tärytettiin ympäriltä kiinni pitäen siihen asti, kun paalun painuminen pysähtyi. Lopputärytys tehtiin paalun päältä putkeniskijän alaleukoihin kiinnitettävän lopputärytystyökalun avulla (Kuva 13). Pöytäkirjassa paalu on merkitty numerolla 2.1. Paalun korkeusasema määritettiin ennen ja jälkeen lopputärytystä, jotta saatiin selville kuinka paljon syvemmälle päältä täryttämällä paalu vielä saadaan. Paalu painui 81 mm päältä täryttämällä. PDA-mittauksella kantavuudeksi saatiin 1007 kN.



**Kuva 13.** Movax SP-60W ja alaleukoihin kiinnitetty lopputärytystyökalu.

4. Seuraavana päivänä edellisen paalun läheisyyteen tärytettiin kaksi paalua. Paaluja tärytettiin ympäriltä kiinni pitäen, kunnes tunkeutuminen pysähtyi. Paalujen lopputärytys tehtiin päältä (pöytäkirjassa 2.2 ja 2.3). Mittauspaaluna käytettiin molemmissa mittauksissa paalua numero 2. Lopputärytyksessä paalut painuvat vielä 29 ja 45 mm. PDA-mittauksella paalujen kantavuudeksi saatiin 840 ja 730 kN.
5. Rettiginrinteen puoleisen rantamuurin eteen kaksi paalua meni painattamalla suoraan kallioon. Tässä kohtaa moreenikerros kallion päällä on ilmeisesti todella ohut, eikä siten vastustanut yhtään paalun painumista. Näistä paaluista ei saatu tärytysinformaatiota, eikä niille tehty PDA-kokeita.
6. Aboa Vetuksen puoleisen rantamuurin eteen tärytettiin paalu, joka tärytettiin ympäriltä kiinni pitäen, kunnes tunkeutuminen pysähtyi. Paalun lopputärytys tehtiin päältä (pöytäkirjassa 2.4). PDA-mittauksella paalun kantavuudeksi saatiin 1000 kN.

**Taulukko 4.** Kirjastosillan työmaan koepaalutuksen pöytäkirja 16.1.2013.

Kellonaika	Sijainti	Tapahtuma	Lopputärytys/-lyönnit			Kokonaisasennus		
			Mittauspaalu	Tunkeuma [mm]	Aika [m:s]	Pituus [m]	Aika [min.]	PDA $F_{RMX}$ [kN]
10:11	Kauppiaskadun pää, lähimpänä työsiltaa ja rantamuuria	Lyöntipaalu, tiivis täyttökerros, jonka jälkeen jäi jumiin (pora-paalun pätkä?)				10,5	26	
12:09	Edellisen vieressä, muutama metri joen keskelle päin	Lyöntipaalu, "meni normaalisti", PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 40 mm				14	11	1100
12:30	Aboa Vetuksen puoleinen rantamuri	Tärytetty 1. pohjapaalu, rantamuurin tuntumassa, meni suoraan kovaan kerrokseen				6	2	
		Tärytetty 2. pohjapaalu, neljä metriä joen keskelle päin				7	3	
13:30		Lopputärytys sivusta	3	270	2:05			
16:10		PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 490 mm		70				256
14:56	Kauppiaskadun pää, muutama metri työsillasta pois päin	Tärytetty 3. pohjapaalu, putki meni hieman soikeaksi kouran luistaessa --> ei saa välttämättä kaikkea voimaa paaluun	2.1			10	5	
16:10		Lopputärytys päältä	2.1	81	1:23			
17:30		PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 17 mm		4				1007

**Taulukko 5.** Kirjastosillan työmaan koepaalutuksen pöytäkirja 17.1.2013.

Kellon- aika	Sijainti	Tapahtuma	Lopputärytys/-lyönnit			Kokonaisasennus		
			Mittauspaalu	Tun- keuma [mm]	Aika [m:s]	Pituus [m]	Aika [min.]	PDA F <sub>RMX</sub> [kN]
07:57	Kauppiaskadun pää, muutama metri työsillasta pois päin	Tärytetty 4. pohjapaalu				11	5,5	
09:37		Lopputärytys päältä, kamera ja ääni muutaman sekunnin jäl- jessä	päältä, 2.2	29	1:07			
		PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 26 mm		11				840
8:06	Aboa Vetuksen puo- leinen rantamuuri	Lyöntipaalu, toteutuman mittaus				8,5	5	
9:49	Kauppiaskadun pää, muutama metri joen keskelle päin	Tärytetty 5. pohjapaalu, painattaen 6 m / 3 min				9	4	
12:47		Lopputärytys päältä	päältä, 2.3	45	0:48			
		PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 71 mm		17				730
13:10	Rettiginrinteen puo- leinen rantamuuri	2 paalua painattaen suoraan kallioon						
14:10	Aboa Vetuksen puo- leinen rantamuuri	Tärytetty 6. pohjapaalu				7,5	2	
		Lopputärytys päältä	päältä, 2.4	163	0:39			
14:37		PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 15 mm		4				1000

### 6.3.2 Kälviänjoen ratasilta, Kälviä

Koepaalutukset suoritettiin Kälviänjoella 12.–13.3.2013. Kokeissa lyötiin kolme ja tärytettiin kuusi testipaalua. Kälviänjoki oli jäässä pinnasta, mutta sillä ei ollut vaikutusta paaluttamisen etenemiseen. Turussa tehtyjen kokeiden myötä havaittiin, että putkeniskijän alaleukoihin kiinnitettävää lopputärytystyökalua on kehitettävä paremmin soveltuvaksi putkikoon 323,9 x 5,0 täryttämiseen. Uusi lopputärytystyökalu (Kuva 14) pysyi merkittävästi paremmin putken pään sisällä luistamatta sivuille, ja todennäköisesti välitti tärytysenergian keskeisemmin pienemmillä häviöillä paaluun. Lopputärytystyökalun mittapiirustus on esitetty liitteessä 3.

Kälviänjoen kokeissa ei tutkittu putkileuoilla täryttämistä paalun ympäriltä kiinni pitäen, koska Turun kokeissa havaittiin, että menetelmällä ei saada kohdistettua ainakaan tutkimuksessa käytettyyn paaluun riittävästi voimaa, jotta vaadittavia kantavuuksia voitaisiin paalulle saada. Putkileuat luistavat paalun ympärillä, eikä puristusvoimaa voida lisätä, koska ohut seinämä menee lyttyyn.

Testipaalut asennettiin työtelineen varsinaisten paalujen paikoille, joten koetta suoritettaessa rakennettiin samalla työtelinettä. Työtelineen rakentaminen aloitettiin Kälviänjoen Oulun puoleiselta penkalta. Työtelineen poikkileikkauksessa on neljä paalua 4,5 metrin välein, pituussuunnassa paalujen jako on neljä metriä. Taulukossa 6 ja 7 on esitetty koepaalujen asennus yksityiskohtaisesti. Kokeiden kulku on selostettu aikajärjestyksessä seuraavassa luettelossa:

1. Kokeet aloitettiin 12.3.2013 täryttämällä kaksi paalua työtelineen kolmanteen riviin vasemmalta aloittaen (pohjatutkimukset, itäisen radan pituusleikkaus). Paaluja tärytettiin ympäriltä kiinni pitäen siihen asti, kun paalun painuminen pysähtyi.
2. Samalla aloitettiin paalujen lyömällä asentaminen työtelineen kolmannen rivin oikeasta reunasta. Ensimmäinen lyöntipaalu meni riittävän syvälle ja tiukkaan, mutta toinen paalu oikealta pysähtyi pinnassa olevaan lohkareseen. Paalun paikkaa siirrettiin oikealle päin ja sen läheisyyteen asennettiin täryttämällä yksi paalu lisää, jotta paalujen jakoväli työtelineen poikittaissuunnassa ei kasvaisi liian suureksi.
3. Lyömällä asennettujen paalujen kantavuus määritettiin PDA-mittauksella. Paalujen kantavuudeksi saatiin 750 ja 860 kN ( $F_{RMX}$ ). Kuva 15 suoritetaan PDA-mittausta työtelineen kolmannen rivin paaluista.





**Kuva 14.** Movax SP-60W ja alaleukoihin kiinnitetty uusi lopputärytystyökalu.

4. Kolmen täryttämällä asennetun paalun päähän hitsattiin venymäliuskalliset mitauspaalut numerot 5, 1 ja 6 (pöytäkirjassa 5.1, 1.1 ja 6.1). Tämän jälkeen paaluille tehtiin lopputärytys paalujen päältä uuden lopputärytystyökalun avulla. Paalujen korkeusasema ennen ja jälkeen lopputärytyksen määritettiin vaaituskojeella, jotta saatiin selville kuinka paljon syvemmälle päältä täryttämällä paalu vielä saadaan. Paalut painuivat vielä 24, 392 ja 355 mm. Lopputärytetyjen paalujen kantavuus määritettiin PDA-mittauksella. Kantavuuksiksi saatiin 950, 970 ja 890 kN. Venymäliuskallinen paaluelementti pidettiin yhä kiinni paalussa, jotta venymäliuskoilla saatua iskuaaltokäyrää voidaan jälkeinpäin verrata PDA-laitteistolla saatuun käyrään. Näin saadaan varmempi kuva venymäliuskojen oikeanlaisesta toiminnasta ja kalibroinnin onnistumisesta.
5. Seuraavana päivänä asennettiin lyöntipaalu työtelineen seuraavaan eli neljänteen riviin oikeaan reunaan radan viereen. Paalu lyötiin oletetun kovan kerroksen syvyyteen. PDA-mittauksella kantavuudeksi saatiin 1200 kN.
6. Tärytettiin paalun ympäriltä kiinni pitäen kolme paalua työtelineen neljänteen riviin vasemmalta aloittaen. Paaluja tärytettiin painumisen pysähtymiseen asti, jonka jälkeen päihin hitsattiin venymäliuskalliset jatkokset (pöytäkirjassa 6.2, 5.2 ja 1.2). Painuminen lopputärytyksen aikana määritettiin jälleen vaaittamalla. Paalut painuivat vielä 261, 390 ja 247 mm.



**Kuva 15.** Kantavuuden mittausta PDA:lla työtelineen kolmannen rivin paaluista.

7. Lopputärytettyjen paalujen kantavuus määritettiin PDA-mittauksella. Kantavuuksiksi saatiin 1000, 620 ja 840 kN. Paalun 5.2 huomattiin lopputärytyksessä pomppivan voimakkaasti, mikä on merkki siitä, että paalun kärki on törmännyt isoon kiveen. PDA-mittauksessa paalun kärki lähti todennäköisesti luistamaan sivuun lyöntien saattamana tai kivi saattoi hieman liikahtaa, mikä saattaa selittää muita pienemmän kantavuuden.



**Taulukko 6.** Kälviänjoen ratasillan työmaan koepaalutuksen pöytäkirja 12.3.2013.

Kellonaika	Sijainti	Tapahtuma	Lopputärytys/-lyönnit			Kokonaisasennus		
			Mittauspaalu	Painuma [mm]	Aika [m:s]	Pituus [m]	Aika [min.]	PDA $F_{RMX}$ [kN]
9:22	Työsillan 3. rivi, 1. paalu vasemmalta	Tärytetty 1. pohjapaalu				4,1	8	
12:45		Lopputärytys päältä	5.1	24	0:36			
14:14		PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 15 mm	5.1	10				950
9:30	Työsillan 3. rivi 5. vasemmalta, radan vieressä	Lyöntipaalu 1 PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 100 mm		15		5	30	750
9:39	Työsillan 3. rivi, 2. paalu vasemmalta	Tärytetty 2. pohjapaalu				4,5	3	
12:55		Lopputärytys päältä	1.1	392	0:56			
14:06		PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 45 mm	1.1	12				970
10:35	Työsillan 3. rivi 4. vasemmalta	Lyöntipaalu 2 PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 65 mm				4,8	27	860
10:58	Työsillan 3. rivi, 3. paalu vasemmalta	Tärytetty 3. pohjapaalu	6.1			4,5	8	
13:02		Lopputärytys päältä	6.1	355	1:06			
13:50		PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 50 mm	6.1	7				890

**Taulukko 7.** Kälviänjoen ratasillan työmaan koepaalutuksen pöytäkirja 13.3.2013.

Kellonaika	Sijainti	Tapahtuma	Lopputärytys/-lyönnit			Kokonaisasennus		
			Mittauspaalu	Painuma [mm]	Aika [m:s]	Pituus [m]	Aika [min.]	PDA $F_{RMX}$ [kN]
7:02	Työsillan 4. rivi 4. vasemmalta, radan viereessä	Lyöntipaalu 3 PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 21 mm		4		3,5	20	1200
7:55	Työsillan 4. rivi, 1. paalu vasemmalta	Tärytetty 4. pohjapaalu				4,8	8	
9:14		Lopputärytys päältä	6.2	261	0:52			
10:06		PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 30 mm	6.2	6				1000
8:04	Työsillan 4. rivi, 2. paalu vasemmalta	Tärytetty 5. pohjapaalu				2,8	5	
9:25		Lopputärytys päältä	5.2	390	1:16			
9:57		PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 170 mm	5.2	18				620
8:11	Työsillan 4. rivi, 3. paalu vasemmalta	Tärytetty 6. pohjapaalu				2	4	
9:36		Lopputärytys päältä	1.2	247	0:55			
10:06		PDA-mittaus, painuma 10 lyönnillä 74 mm	1.2	10				840

## 6.4 Kokeiden tulosten erittely

### 6.4.1 Kirjastosilta, Turku

Kirjastosillan työmaalla koepaaluja asennettaessa paalut pysähtyivät todennäköisesti paksun ja helposti läpäistävän saven alla olevaan tiiviiseen moreenikerrokseen. Paalut menivät nopeasti saven läpi ja moreenikerroksen saavuttaminen oli helppo huomata paalun painumisen merkittävästi hidastuessa. Paalujen tunkeutumisnopeus voitiin määrittää jälkeenpäin lopputärytyksen aikana kuvatusta videoleikkeestä. Videolta määritettiin viimeiset ajanjaksot, jolloin paalun painumista tapahtui, ennen kuin paalun liike asennettaessa silmämääräisesti pysähtyi. Tarkkailtavaksi lopputärytysajaksi valittiin viimeiset 30 sekuntia, sillä lyhyemmässä tarkastellussa ajassa muutosta paalun painumisessa on vielä vaikeampi huomioida. Työmaaolosuhteissa tehtävä lopputärytyksen aikainen paalun painuman määrittäminen ilman videota on epätarkkaa, joten lyhyemmän määrittämissajanjakson käyttäminen ei ole käytännöllistä. Toisaalta 30 sekuntia pidemmässä ajanjaksossa tapahtuva painuma on suurempaa ja nopeampaa, sen vaihtuvuus tilanteen mukaan on suurempaa, eikä se kerro loppukantavuudesta välttämättä mitään.

Vertailun ja kantavuuden varmistamisen selkeyden vuoksi videoleikkeestä on määritetty viimeisen 10 sekunnin painuma, sillä pidemmällä mittausaikavälillä paalun painuminen saattaa edetä yhtäkkisesti, mutta viimeisillä hetkillä ennen paalun tunkeutumisen pysähtymistä epätasaisen painuman todennäköisyys on pienempi, joten painuma-arvot ovat vertailukelpoisempia.

**Taulukko 8.** Täryttämällä asennettujen paalujen painuma 30 ja 10 sekunnissa ja PDA-mittauksella saadut kantavuudet.

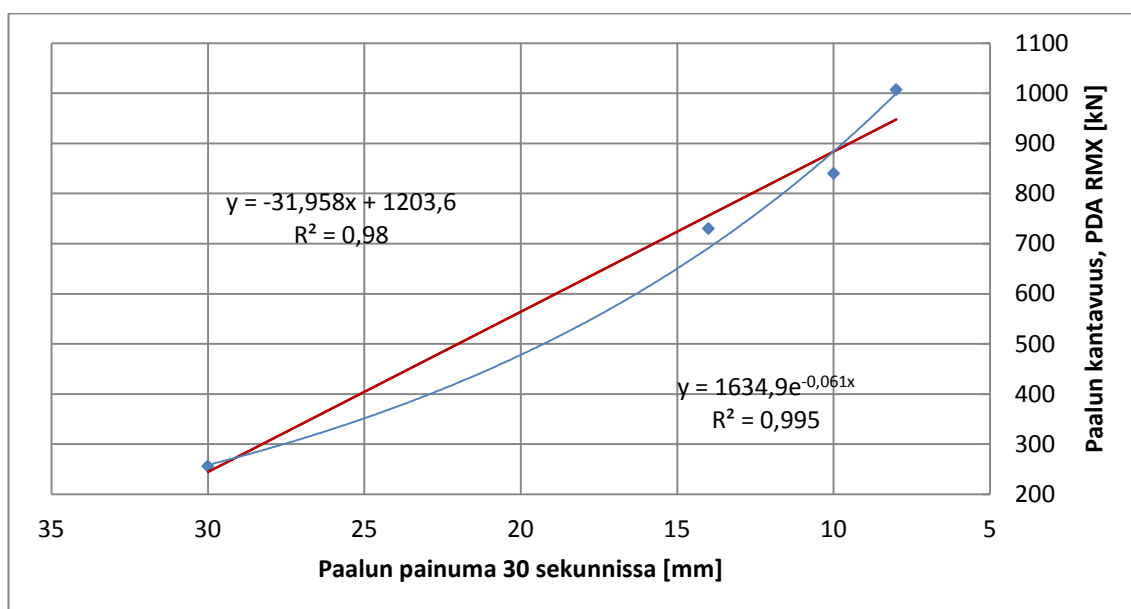
Paalu nro	Painuma viimeisellä 30 sekunnilla [mm]	Painuma viimeisellä 10 sekunnilla [mm]	PDA RMX [kN]
Lyöntipaalu			1100
3	30	20	256
2.1	8	2	1007
2.2	10	6	840
2.3	14	8	730
2.4	90	3	1000

Yllä olevassa taulukossa (Taulukko 8) on esitetty täryttämällä asennettujen paalun painuma asennuksen viimeisen 30 ja 10 sekunnin aikana ja paalujen PDA-mittauksella mitattu kantavuus. Paalu 2.4 meni asennettaessa nopeasti ohuen moreenikerroksen läpi ja pysähtyi kallioon, joten sen painuma-arvon ja kantavuuden välistä yhteyttä ei ole verrattu muiden paalun arvoihin, vaikka 10 sekunnin tarkastelussa painuman ja kantavuuden

den arvot vastaavat paalun 2.1 arvoja. Kaikki muut paalut jäivät lopputärytyksessä tiiviiseen moreenikerrokseen, joten niiden tulosten vertailu on järkevää.

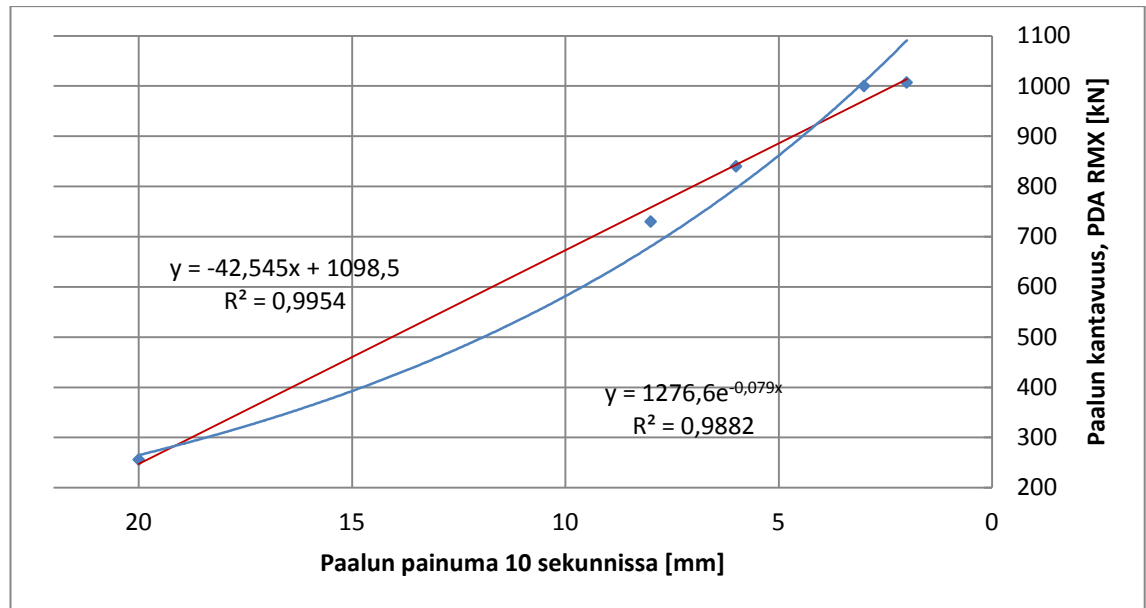
Taulukosta (Taulukko 8) voidaan huomata, että tehtäessä lopputärytys paalun päältä saadaan paalun kantavuudella saman suuruusluokan arvoja kuin lyömällä asennetuille paaluille. Tässä kokeessa ei lyöty kuin yksi verrokkipaalu, mutta esimerkiksi Tarhasaaren (2001) diplomityössä saman tehoisella lyöntikalustolla on asennettu samanlaisia teräsputkipaaluja joiden kantavuudeksi PDA-mittauksella on saatu 780–1000 kN.

Alla olevassa kuvaajassa (Kuva 16) on esitetty täryttämällä asennettujen paalujen PDA-mittauksella saadut kantavuudet tärytyksen viimeisen 30 sekunnin aikana tapahtuneen painuman funktiona. Pisteiden mukaan on piirretty lineaarinen ja eksponentiaalinen regressiokäyrä, joiden yhtälöt on esitetty myös kuvassa.



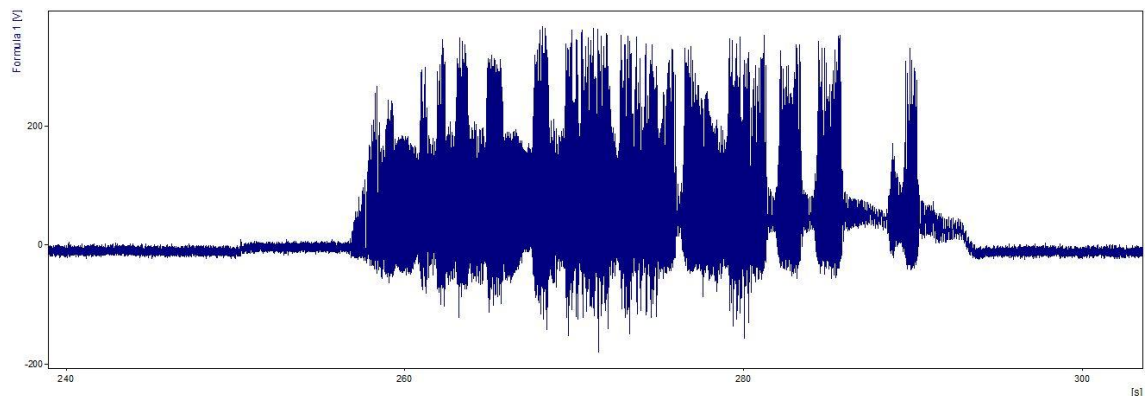
**Kuva 16.** Paalujen kantavuus 30 sekunnin painuman funktiona.

Alla olevassa kuvaajassa (Kuva 17) on täryttämällä asennettujen paalujen PDA-mittauksella saadut kantavuudet tärytyksen viimeisen 10 sekunnin aikana tapahtuneen painuman funktiona. Pisteiden mukaan on piirretty lineaarinen ja eksponentiaalinen regressiokäyrä, joiden yhtälöt on esitetty myös kuvassa.



**Kuva 17.** Paalujen kantavuus 10 sekunnin painuman funktiona.

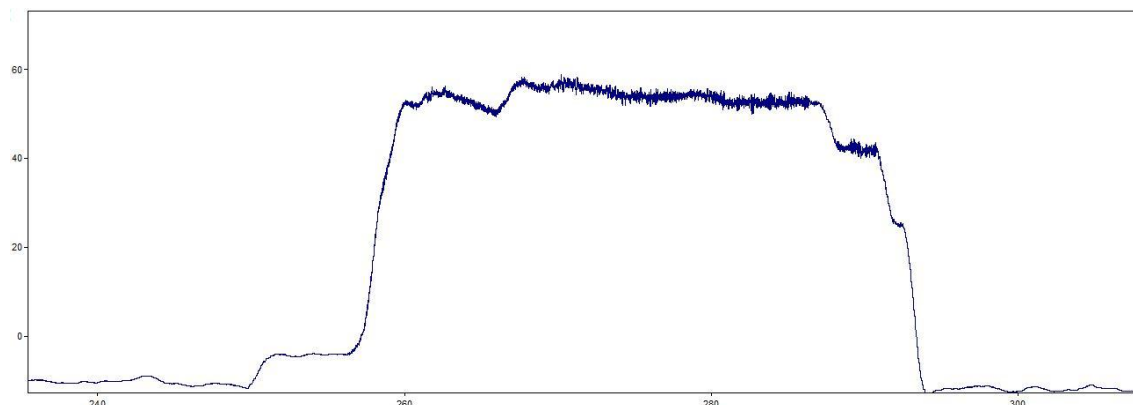
Ensimmäisessä 30 sekunnin tarkastelussa eksponentiaalinen regressio korreloi lineaaris-  
ta paremmin ja 10 sekunnin tarkastelussa lineaarisen regression korrelaatiokerroin on  
taas suurempi. Jälkimmäisen tarkastelun lineaarinen korrelaatiokerroin on kaikista kor-  
relaatiokertoimista suurin. Korrelaation tarkastelu ei kuitenkaan paljasta välittömästi  
paalun tunkeutumisnopeuden ja kantavuuden syy-seuraussuhdetta. Näin pienessä otok-  
sessa sattumalla voi olla suuri merkitys. Bosscherin (1998) mukaan tärytettävän paalun  
tunkeutumisnopeuden hidastuminen on merkki maan dynaamisen vastuksen kasvami-  
sesta, joka lisää paalun kantavuutta. Päätelmä vaikuttaa hyvin loogiselta ja mittaukset  
viittaavat samanlaiseen tulemaan.



**Kuva 18.** Kuvakaappaus FlexPro:sta. Paalu 2.4:n asennustapahtuma voima-  
aikakuvaajana. Y-akselin yksikkö on kN ja x-akselin sekunti.

Paalua maahan painavaa dynaamista ja staattista voimaa mitattiin venymäliuskoilla ja  
tallennettiin tietokoneelle DASYLab-ohjelmalla. Venymäliuskat mittasivat paaluun  
kohdistuvan aksiaalisen kuormituksen 5000 kertaa sekunnissa. Mittatiedostojen koko  
kasvoi hyvin suureksi, joten niiden analysointi Microsoft Excel -ohjelmalla ei ollut su-  
juvaa eikä mielekästä. Tiedon käsittelyyn ja suodattamiseen käytettiin siksi FlexPro 6 -

ohjelmaa. Mittatiedostoja käsiteltäessä voitiin huomata, että 5000 Hz:n mittaustaajuus on todella suuri tärytyksen mittaamiseen. Suodattamalla pois neljä mittausta viidestä saatiin mittaustaajuus yhteen viidesosaan eli 1000 Hz:n, jolloin tiedoston koko pieneni merkittävästi ja tiedonkäsittely oli paljon sujuvampaa. Suodatettu mittausinformaatio oli yhä riittävän tarkka tiedon analysointiin. Kuva 18 on esitetty paalu 2.4:n tärytystapah-tuma voima-aikakuvaajana.



**Kuva 19.** Kuvakaappaus FlexPro:sta. Keskiarvofunktion läpi ajettu paalu 2.4:n voima-aikakuvaaja.

Staattisen voiman suuruus määritettiin venymäliuskojen ja DASyLab-ohjelman tallentamasta tietoa-aineesta. Ensin piirrettiin voima-aikakuvaaja, josta piirrettiin edelleen 1000 mittauksen juokseva keskiarvokuvaaja. Keskiarvokuvaajaan jäi tällöin jäljelle jakso-ollisen voiman nollakohta, joka suoraan ilmaisi staattisen voiman eli kaivinkoneen painatusvoiman. Kuva 19 on esitetty keskiarvokuvaaja paalusta 2.4, josta voidaan hetkellinen staattinen voima helposti havaita. Staattinen voima lopputärytyksen aikana on esitetty Taulukko 9.

**Taulukko 9.** Täryttämällä asennettujen paalujen suurin painatusvoima viimeisen 30 sekunnin aikana ja PDA-mittauksella saadut kantavuudet.

Paalu nro	PDA RMX [kN]	Suurin staattinen voima viimeisellä 30 se-kunnilla [kN]
3	256	56
2.1	1007	66
2.2	840	65
2.3	730	59
2.4	1000	66

Taulukko 9 on huomattavissa, että staattinen painatusvoima kaikissa asennustilanteissa lähes samaa suuruusluokkaa 56...66 kN, eikä sen suuruuden vaikutuksesta paalun lop-pukantavuuteen voida vetää johtopäätöksiä. Ero painatuksessa todennäköisesti johtuu kaivinkoneen etäisyydestä tai telojen kulmasta tärytettävään paaluun. Etäisyyden kasva-

essa paalusta kaivinkoneen tukipisteeseen, telojen takaosaan, pienenee paaluun kohdistuva pystysuora painatusvoima.

**Taulukko 10.** Täryttämällä asennettujen paalujen värähtelytaajuus lopputärytyksen aikana.

Paalu nro	PDA RMX [kN]	Taajuus viimeisellä 30 sekunnilla [Hz]	Taajuus viimeisellä 10 sekunnilla [Hz]
3	256	50	50
2.1	1007	41	42
2.2	840	42	41
2.3	730	15	15
2.4	1000	44	24

Paalujen tärytystaajuus viimeisen 30 ja 10 sekunnin aikana määritettiin FlexPro:lla tekemällä Fourier'n muunnos, jolla saatiin jaksollisen voiman taajuus ja tietyn taajuuden amplitudi esitettyä kuvaajassa. Tästä kuvaajasta voitiin lukea mikä on vallitsevin taajuus lopputärytyksen aikana. Paalukohtaiset tärytystaajuudet on esitetty Taulukko 10. Paalu numero 3 on paalun ympäriltä kiinni pitäen tärytetty ja taajuudesta voidaan huomata, että se on molemmissa tarkasteluissa suurin taajuus, johon käytetty Movax SP-60W pystyy. Tämä ilmiö johtuu varmasti siitä, että paalu on kokoajan jäykästi kiinni täryvasarassa ja paalu värähtelee täysin epäkeskopainojen pyörimistaajuudella.



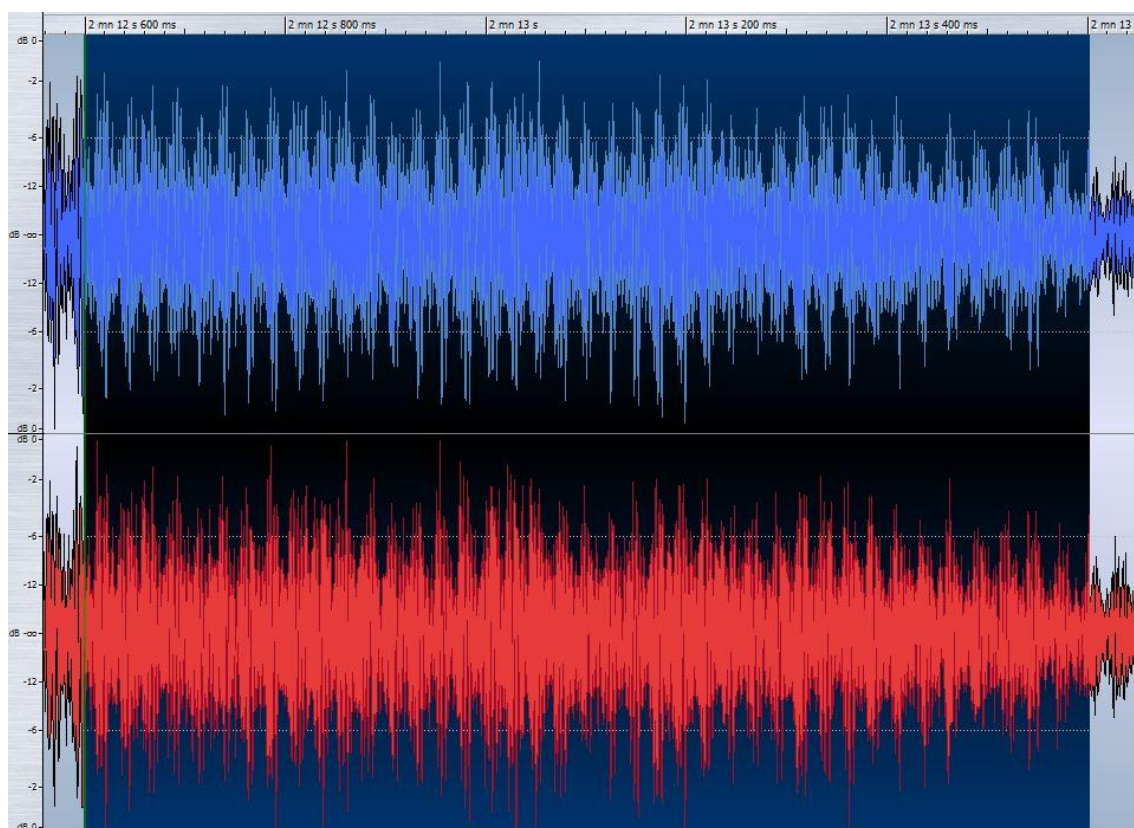
**Kuva 20.** Paalun päältä tehtävä lopputärytys Turussa.

Paalun päältä tehtävässä lopputärytyksessä (Kuva 20) paalu + tärytin -systeemi ei käytäydy täysin samalla tavalla kuin täryttimen tarttuessa leuoillaan jäykästi paalun ympä-



rille. Päältä tärytettäessä tärytin pomppii irroten ajoittain paalun päästä. Putkeniskijä toimii tällaisessa tilanteessa kuin suuritaajuinen lyöntilaite. On mahdollista, että paalu ei tällöin liiku pystysuunnassa samassa tahdissa kuin tärytin, vaan osassa heilahdusliikkeistä paalu lyö takaisin tai tärytin on hetkellisesti irti jolloin paalun taajuus pienenee. Paalun 2.3 mitattu taajuus on merkillinen, sillä se on merkittävästi pienempi kuin muut päältä tärytettyjen paalujen arvot. Paalun mitattu kantavuus ei ole kuitenkaan merkittävästi pienempi kuin muiden päältä tärytettyjen paalujen. Saattaa olla, että tämän paalun tärytyksessä osassa epäkeskopainojen heilahduksista paalu on lyönyt vastavaiheessa takaisin, jolloin voiman taajuus on puolittunut, ja osassa heilahduksista paalu on ollut irti täryttimestä. Toinen mahdollinen syy voi olla paalun tulppaantuminen, sillä avoimen paalun päähän muodostuva maatulppa saattaa vaimentaa paalun liikettä merkittävästi.

Aikaisempien tutkimusten mukaan (kts. kappale 5.1) paalun värähtelytaajuuden pitäisi pienentyä dynaamisen vastuksen ja siten paalun kantavuuden kasvaessa. Näin tapahtuu varmasti tilanteessa, jossa putkeniskijä tarttuu ympärille kiinni ja on siten jäykästi kiinni täryttimessä. Päältä tärytettäessä täryttimen taajuus ei välttämättä muutu samalla tavalla dynaamisen vastuksen mukaan, vaan tärytin lyö paalun päätä kärjen pysähtymisestä huolimatta. Tämä saattaa olla syy miksi päältä täryttämällä saadaan paalulle merkittävästi suurempia kantavuuksia.



**Kuva 21.** Ote paalun 2.2 äänileikkeestä, kuvakaappaus Steinberg Wavelab 7 -ohjelmasta.

Tärytin-paalu-systeemin taajuus lopputärytyksen aikana määritettiin myös mikrofonilla tallennetusta äänileikkeestä. Ääniaaltokuvaajaa tarkasteltaessa Steinberg Wavelab 7 -



ohjelmalla voitiin huomata, että tärytyksen aikana ilmenee voimakasta korkeataajuisia kohinaa ja sen kerrannaisia, jotka peittävät tärytyksen taajuudella esiintyvää ääntä. Kuva 21. Ote paalun 2.2 äänileikkeestä tummennettu alue on sekunnin pituinen ote paalun 2.2 lopputärytyksen viimeisen 10 sekunnin jaksosta. Kuvasta voidaan huomata hälyäänen alla vallitsevan tärytystaajuuden huiput. Huippukohdat leikkeestä laskemalla saadaan taajuudeksi 42 Hz. Samanlainen määrittäminen tehtiin myös muille paaluille ja havaittiin, että taajuudelle saadaan sama arvo määrittämenetelmästä riippumatta.

Tärytyksen ääni, jonka taajuus määritettiin, aiheutuu todennäköisesti putkeniskijän alaleuoissa kiinni olevan lopputärytystyökalun iskemisestä paalun päähän. Äänileikkeestä määritetty taajuus on siis paaluun kohdistuvien voimien taajuus, kuten FlexPro:lla venymäliuskadatasta määritettykin. Mahdollista syytä paalun 2.3 taajuuden mataluuteen ei saada tällä vertailulla selville. Poikkeuksellinen tärytystaajuus on saattanut vaikuttaa paalun kantavuuteen, sillä korkeammalla taajuudella paalun pitäisi todennäköisesti tunkeutua helpommin pohjamaahan (kts. kappale 4.4 ja 4.5) ja pysähtyen siten yhä tiiviimpään kerrokseen, joka antaisi paalulle korkeamman kantavuuden.

**Taulukko 11.** Täryttämällä asennettujen paalujen värähtelytaajuus lopputärytyksen aikana.

Paalu nro	PDA RMX [kN]	Suurin staattinen voima viimeisellä 30 sekunnilla [kN]	Suurin dynaaminen + staattinen voima viimeisellä 30 sekunnilla [kN]
3	256	56	150
2.1	1007	66	340
2.2	840	65	380
2.3	730	59	360
2.4	1000	66	370

Venymäliuskoilla tallennetusta datasta määritettiin paaluihin kohdistettu suurin voima FlexPro 6 -ohjelman avulla, etsimällä jaksollisen käyrän suurin arvo tärytyksen viimeisen 30 sekunnin aikana. Määrittämisessä ei ole huomioitu yksittäisiä toistumattomia piikkejä kuvaajassa, vaan voima on määritetty vallitsevasta suurimmasta arvosta lopputärytyksen aikana. Arvo sisältää staattisen painatusvoiman ja dynaamisen tärytysvoiman. Taulukko 11 on havaittavissa, että päältä tärytetyjen paalujen asennusvoima on suunnilleen samaa suuruusluokkaa, mutta paalun ympäriltä tarraten tärytettäessä paaluun kohdistuva voima on merkittävästi pienempi. Näyttää siltä, että asennusvoiman suuruudella ei ole merkitystä paalun loppukantavuuteen.



**Kuva 22.** Putkileuan raapimia uurteita paalun ympärillä.

Ympäri kiinni pitäen tärytettäessä, leuka saattaa luistaa painaen poikkileikkausta lyttyyn. Ohuella paaluseinämällä suurempaa leuan puristusta ei voida välttämättä käyttää. Tämä on todennäköisesti syy miksi paaluun 3 kohdistettu asennusvoima on alle puolet verrattaessa päältä tärytettyjen paalujen arvoon. Movax SP-60W:n pitäisi pystyä suurimmillaan 660 kN:n asennusvoimaan, joten paaluun 3 kohdistettu on alle neljäsosa teoreettisesta maksimista. Kuva 22 näkyy luistaneen putkileuan raapima teräspaaluputken kylki.

#### 6.4.2 Kälviänjoen ratasilta, Kälviä

Kälviänjoen työtelineen paaluja asennettaessa paalut pysähtyivät todennäköisesti siltti- tai hiekkakerroksen jälkeen tiiviiseen moreeniin, sillä kalliopinta on selkeästi syvemmällä kuin maahan asennetut paalupituudet (Taulukko 6. Kälviänjoen ratasillan työmaan koepaalutuksen pöytäkirja 12.3.2013. ja Taulukko 7. Kälviänjoen ratasillan työmaan koepaalutuksen pöytäkirja 13.3.2013.. Paalujen painumisnopeus määritettiin samalla tavalla kuin aikaisemmassa Turun koekohteessa lopputärytyksen aikana kuvatusta videoleikkeestä. Paalujen painuma määritettiin millimetreinä lopputärytyksen viimeisen 30 ja 10 sekunnin aikana. Aikaisempien koepaalutusten suorittamista kehittäen lopputärytysaika määritettiin nyt tarkasti sekuntikellolla, siten että koko lopputärytys kesti vähintään 30 sekuntia tai niin kauan kuin paalun painumisen eteneminen vielä silmämääräisesti havaittiin. Paalun tunkeutumisen pysähtyttyä tärytystä jatkettiin vielä 10 sekuntia. Näin pyrittiin varmistamaan, että tulokset ovat selkeämmin vertailtavissa jälkeensä.

**Taulukko 12.** Täryttämällä asennettujen paalujen painuma 30 ja 10 sekunnissa ja PDA-mittauksella saadut kantavuudet.

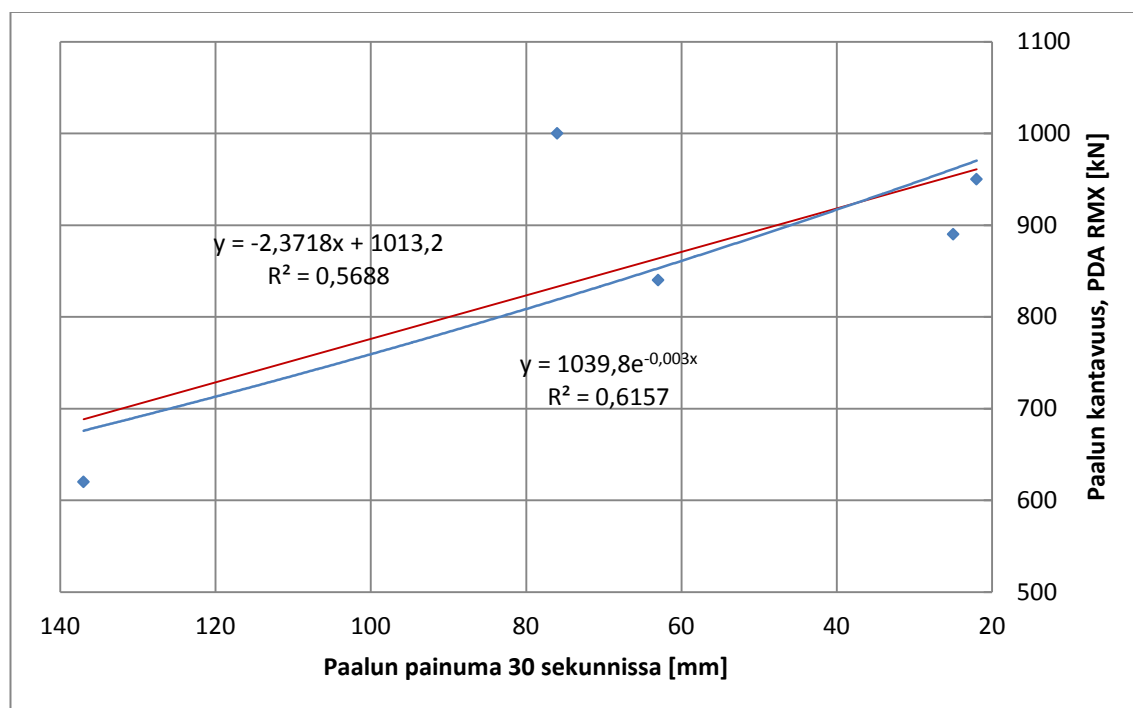
Paalu nro	Painuma viimeisellä 30 sekunnilla [mm]	Painuma viimeisellä 10 sekunnilla [mm]	PDA RMX [kN]
Lyöntipaalu 1			750
Lyöntipaalu 2			860
Lyöntipaalu 3			1200
5.1	22	6	950
1.1	99	29	970
6.1	25	15	890
5.2	137	21	620
1.2	63	13	840
6.2	76	8	1000

Yllä olevassa taulukossa (Taulukko 12) on esitetty täryttämällä asennettujen paalun painuma asennuksen viimeisen 30 ja 10 sekunnin aikana ja paalujen PDA-mittauksella mitattu kantavuus. Vertailtavaksi taulukossa on myös esitetty lyömällä asennettujen paalujen PDA-mittauksella määritetyt kantavuudet. Paalujen 30 sekunnin painuma-arvoissa on merkittävästi enemmän hajontaa, kuin 10 sekunnin painuma-arvojen vertailussa. Kymmenen sekunnin mittauksissa painuman hajonta pienenee, koska aika on lyhyempi ja paalun tunkeutumisenopeuden voidaan havaita silmämääräisesti hidastuneen, jolloin merkittävää painumista ei enää tapahdu. Paalujen 10 sekunnissa tapahtunut painuma on kuitenkin yllättävän vaihtelevaa, vaikka koetilanteessa jokaisen paalun painuma näytti samalla tavalla pysähtyneen.

Syynä arvojen epätasaisuuteen saattaa olla se, että maaperä Kälviänjoen ratasillan alla on kivistä, eikä kovin homogeenistä, jolloin maaperän vastuksessa suurta vaihtelua pienelläkin alueella. Esimerkiksi paalu 5.2 jäi lopputärytyksessä selkeästi pomppimaan kiven päälle, eikä painunut enää syvemmälle. PDA-mittausta tehtäessä paalun kärki lähti luistamaan lyöntien seurauksena kiven päältä sivuun, mikä vaikutti kantavuuteen laskevasti.

Paalun 1.1 painuma- ja kantavuusarvoissa on epäloogisuutta verrattaessa sitä muiden tärytettyjen paalujen arvoihin. Tämä saattaa johtua PDA-mittauksessa tehtyjen kohdistuslyöntien tavanomaista suuremmasta määrästä. PDA-mittauksen kohdistuslyönnit eivät osuneet tarpeeksi keskeisesti paalun päähän ja toistuvat testilyönnit painoivat paalua vielä täryttämisen jälkeen lisää, mikä lisäsi kantavuutta, mutta ei näy tärytyksen painuma-arvoissa. Tästä syystä paalun 1.1 arvot on jätetty pois piirrettäessä painuma-loppukantavuuskuvaajia (Kuva 23 ja Kuva 24). Voidaan huomata, että myös karkearakeisessa maassa täryttämällä asennetuilla paaluille saadaan saman suuruusluokan loppukantavuuksia kuin lyömällä asennetuille. Paalun päältä täryttämällä voitiin saavuttaa yli 800 kN kantavuuksia kitkamaassa, vaatimuksena että paalun kärki ei jää kovan kaltevan pinnan päälle, josta sen on mahdollisuus luistaa sivuun.

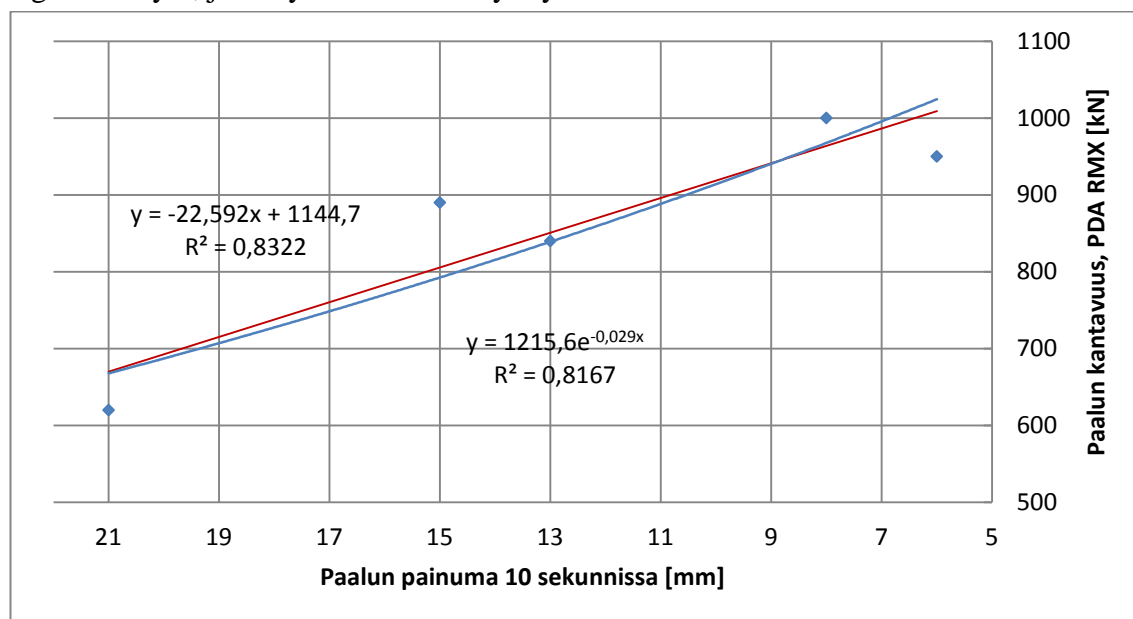
Alla olevassa kuvaajassa (Kuva 23) on esitetty täryttämällä asennettujen paalujen PDA-mittauksella saadut kantavuudet tärytyksen viimeisen 30 sekunnin aikana tapahtuneen painuman funktiona. Pisteiden mukaan on piirretty lineaarinen ja eksponentiaalinen regressiokäyrä, jonka yhtälö on esitetty myös kuvassa.



**Kuva 23.** Paalujen kantavuus 30 sekunnin painuman funktiona.

Alla olevassa kuvaajassa (Kuva 24) on täryttämällä asennettujen paalujen PDA-mittauksella saadut kantavuudet tärytyksen viimeisen 10 sekunnin aikana tapahtuneen

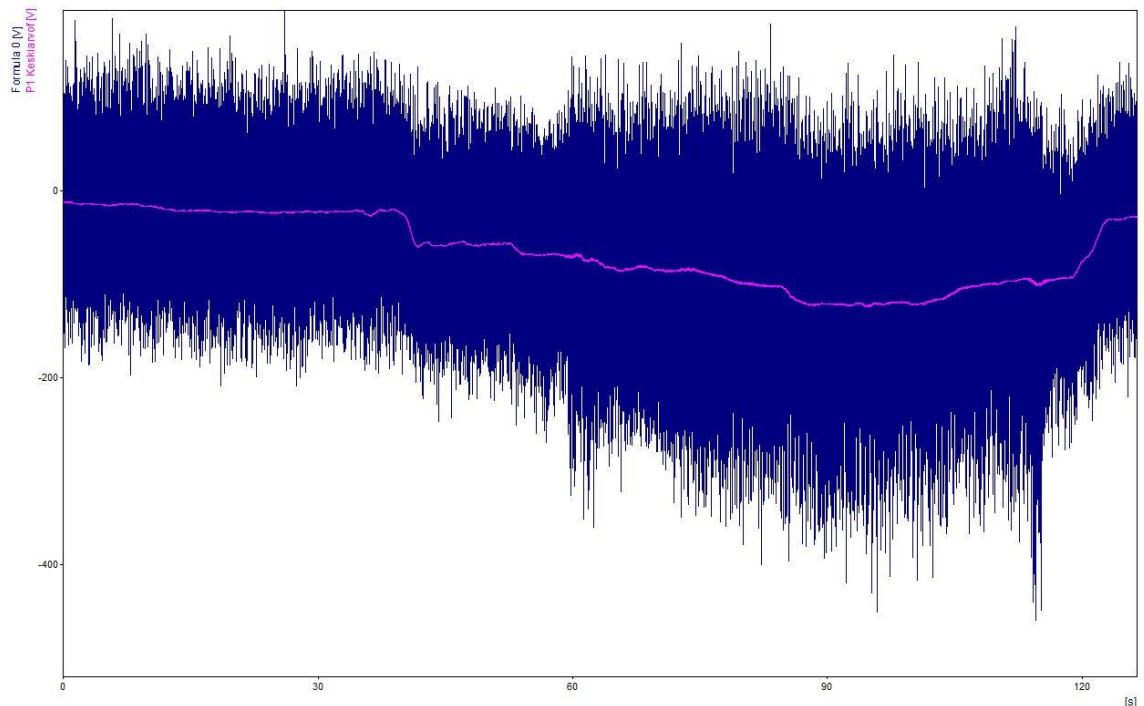
painuman funktiona. Pisteiden mukaan on piirretty lineaarinen ja eksponentiaalinen regressiokäyrä, jonka yhtälö on esitetty myös kuvassa.



**Kuva 24.** Paalujen kantavuus 10 sekunnin painuman funktiona.

Ensimmäisessä 30 sekunnin tarkastelussa eksponentiaalinen regressio korreloi lineaaris- ta paremmin ja 10 sekunnin tarkastelussa lineaarisen regression korrelaatiokerroin on taas suurempi. Kymmenen sekunnin tarkastelun lineaarinen korrelaatiokerroin on merkittävästi suurempi kuin 30 sekunnin tarkastelun regressiossa. Kymmenen sekunnin tarkastelun lineaarisen regression korrelaatio on suurin. Samanlainen ilmiö oli huomattavissa myös Turussa tehtyjen kokeiden tulosten tarkastelussa.

Näistä kuvaajista on huomattavissa, kuten aikaisempien kokeiden tuloksistakin, että paalun painumisnopeuden hidastumisen ja loppukantavuuden kasvamisen välillä näyttää pätevän looginen yhteys. Dynaamisen vastuksen kasvaessa paalun liike alaspäin hidastuu ja paalun kantavuus kasvaa.



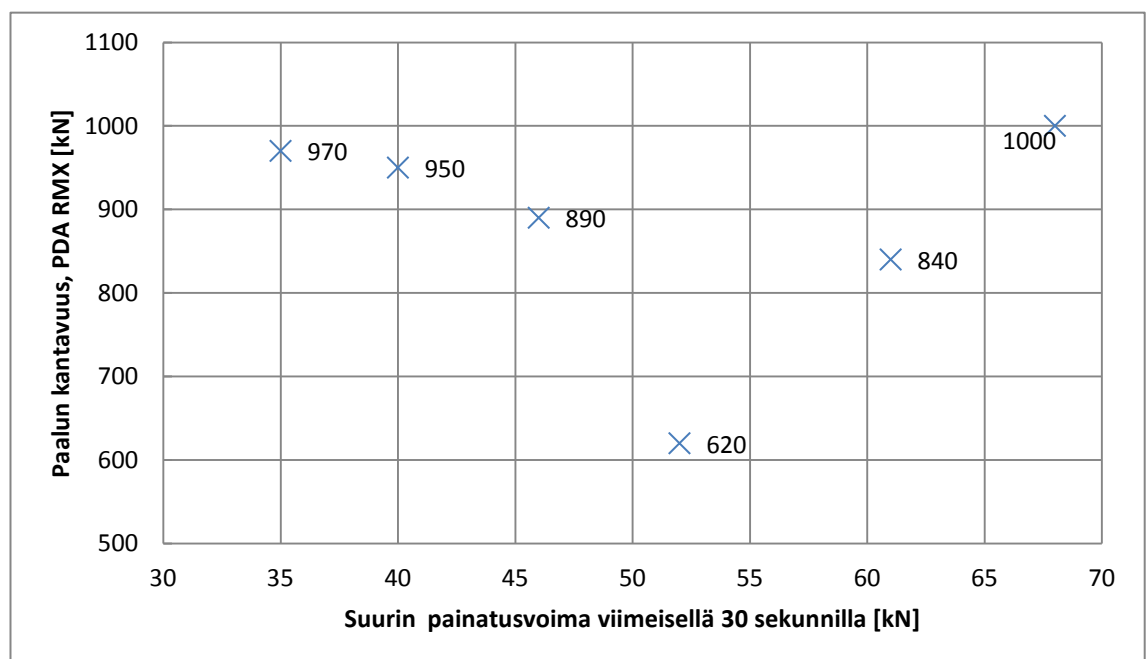
**Kuva 25.** Kuvakaappaus FlexPro:sta. Paalu 1.1:n asennustapahtuma voima-aikakuvaajana sekä juoksevan keskiarvon kuvaaja. Y-akselin yksikkö on kN ja x-akselin sekunti.

Paalua maahan painavaa dynaamista ja staattista voimaa mitattiin venymäliuskamittauslaitteistolla ja tallennettiin DASYLab-ohjelmalla. Tiedon tallennustaajuutena käytettiin nyt 1000 Hz:ä, koska aikaisemmin käytetty 5000 Hz ei lisännyt oleellisesti mittaus-tiedon tarkkuutta, vaan tuotti suuria ja siten turhan raskaita tiedostoja. Kälviälle lähdet-täessä mukaan otettiin väärä mittauslaitteisto ja alun perin kokeisiin tarkoitettu venymä-liuskadatan mittaamiseen soveltuva laite unohtui Tampereelle. Tästä syystä kokeisiin soveltuva laitteisto jouduttiin kokoamaan paikan päällä toisesta mittalaitteesta kytkentö-jä muuttamalla. Tämä aiheutti kahden ensimmäisen paalun mittausdataan merkittävää häiriötä. Häiriö esiintyi vaihtovirran 50 Hz:n taajuudella, mikä on erittäin ongelmallista mittauksen kannalta, sillä tärytyslaitteiston asennustaajuus on lähellä tätä taajuusaluetta. Häiriö saattoi siis peittää alleen oleellista mittausdataa lopputärytyksestä. Kytkentöjen maadoitusta parantamalla saatiin häiriösignaalia oleellisesti pienennettyä ja tärytyksen mittasignaali erottui tällöin paremmin. Kuva 25. Kuvakaappaus FlexPro:sta. Paalu 1.1:n asennustapahtuma voima-aikakuvaajana sekä juoksevan keskiarvon kuvaaja. Y-akselin yksikkö on kN ja x-akselin sekunti. on esitetty paalu 1:n tärytystapahtuma voima-aikakuvaajana sekä juoksevan keskiarvon kuvaaja. Kuvasta on havaittavissa voimakas häiriösignaali, joka esiintyy keskiarvofunktion molemmilla puolilla lähes peittäen oleel-lisen mittaussignaalin.

**Taulukko 13.** Täryttämällä asennettujen paalujen suurin painatusvoima viimeisen 30 sekunnin aikana ja PDA-mittauksella saadut kantavuudet.

Paalu nro	Suurin staattinen voima viimeisellä 30 sekunnilla [kN]	PDA RMX [kN]
5.1	42	950
1.1	63	970
6.1	46	890
5.2	52	620
1.2	61	840
6.2	68	1000

Staattisen voiman suuruus määritettiin tietoaineesta 1000 mittauksen juoksevilla keskiarvolla, josta piirrettiin kuvaaja. Keskiarvokuvaajasta voitiin havaita staattisen painatusvoiman suuruus häiriöstä huolimatta, sillä signaalin nollakohta siirtyi painatusvoiman suuruuden mukaisesti häiriöstä huolimatta, kuten Kuva 25 voidaan huomata. Staattinen voima lopputärytyksen aikana on esitetty paalukohtaisesti Taulukko 13 ja Kuva 26.



**Kuva 26.** Painatusvoiman ja paalun loppukantavuuden kuvaaja.

Taulukko 13 ja Kuva 26 on huomattavissa, että staattisen painatusvoiman suuruus ei ole verrannollinen paalun loppukantavuuden suuruuteen. Vaihtelu painatusvoiman suuruudessa todennäköisesti johtuu tässä tilanteessa kaivinkoneen telojen kiertymisestä tärytettävään paaluun. Kaivinkoneen etäisyys tärytettävään paaluun oli jokaisessa asennustilanteessa lähes sama, koska koetilanteessa asennettiin paaluja riveittäin työtelineeseen. Joissain asennustilanteissa kaivinkone painatti paalua viistosta ja kaivinkoneen telat

kääntyivät tällöin lähes poikittain paaluun nähden. Tällöin kaivinkoneen tukipiste siirtyy lähemmäs paalua vähentäen suurinta mahdollista painatusvoimaa.

**Taulukko 14.** Täryttämällä asennettujen paalujen värähtelytaajuus lopputärytyksen aikana.

Paalu nro	PDA RMX [kN]	Taajuus viimeisellä 30 sekunnilla [Hz]	Taajuus viimeisellä 10 sekunnilla [Hz]
5.1	950	47	47
1.1	970	48	48
6.1	890	50	48
5.2	620	42	45
1.2	840	20	46
6.2	1000	23	46

Paaluun kohdistuvan dynaamisen tärytysvoiman vallitsevin tärytystaajuus viimeisen 30 ja 10 sekunnin aikana määritettiin samalla tavalla kuin aikaisemminkin, tekemällä FlexPro:lla Fourier'n muunnos viimeisen 30 ja 10 sekunnin tärytysdatalle. Muunnoksesta piirrettiin kuvaaja, josta voitiin lukea tietyn taajuuden amplitudi. Suurimman amplitudin taajuus kirjattiin taulukkoon. Paalujen 5.1 ja 1.1 tärytysdatasta suodatettiin 50 Hz:n taajuus pois, jolla häiriösignaalin oletettiin esiintyvän.

Häiriö on sama kuin Movax SP-60W:n suurin tärytystaajuus, mikä on ongelma, sillä suodatuksessa saattaa hävitä oleellista tietoa tärytystapahtumassa vaikuttavista voimista. Turussa tehtyjen kokeiden perusteella voitiin huomata, että päältä tärytetessä paaluun kohdistuvien voimien vallitseva tärytystaajuus ei ole 50 Hz, vaikka tärytin täydellä 50 Hz:n taajuudella toimisikin. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että lopputärytystyökalu on ajoittain irti paalun päästä. Kuva 27 tehdään lopputärytyksen mittausta Kälviänjoella.

Tärytysäänen tallentamista ei käytetty Kälviänjoen kokeissa taajuuden määrittämiseen, koska Turussa tehtyjen kokeiden perusteella huomattiin, että tärytyksen taajuus saadaan määritettyä venymäliuskoilla tallennetusta datasta selkeämmin ja tarkemmin.





**Kuva 27.** Venymäliuskalliset paalut työtelineen 3. rivillä.

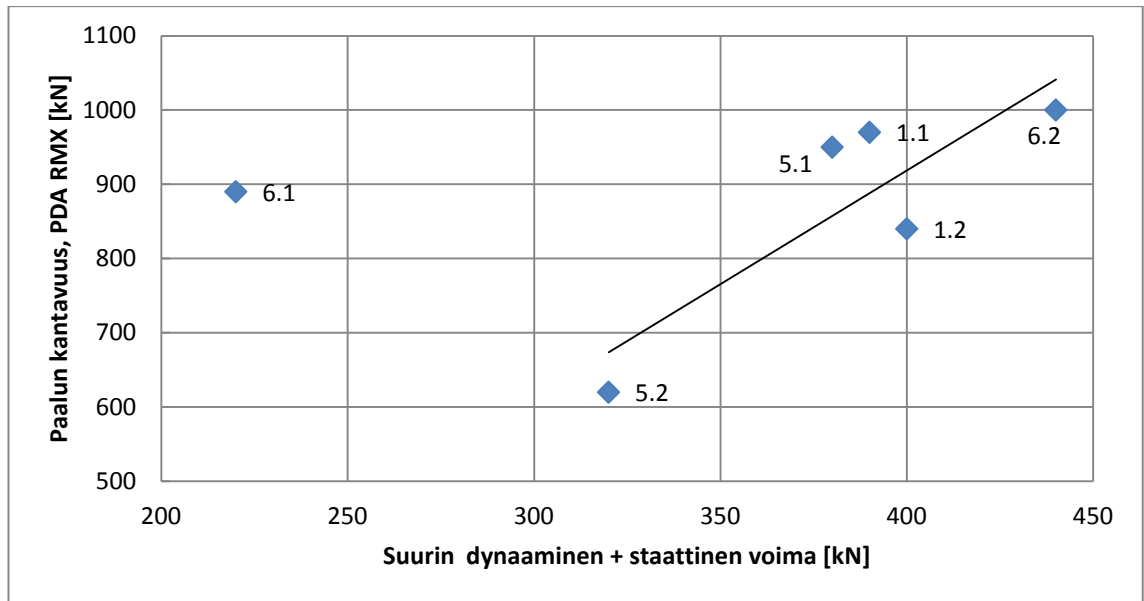
Taulukko 14 on havaittavissa 30 ja 10 sekunnin tarkasteluja verrattaessa, että tärytyksen taajuus kasvaa ja lähestyy täryttimen suurinta taajuutta maan dynaamisen vastuksen kasvaessa ja paalun pysähtymisen lähestyessä. Saattaa olla, että paalun vielä maahan merkittävästi painuessa, putkeniskijä irtoaa hetkellisesti osassa heilahduksista paalun päästä. Tällöin venymäliuskat eivät ole mitanneet jokaista iskusykliä ja dynaamisen voiman taajuus paalussa on alempi, vaikka putkeniskijä lähes täydellä teholla toimisi-kin. Kun paalun painuminen on lähes pysähtynyt, tärytin iskee paalun päähän siten, että jokainen heilahdus osuu. Tämä vaikuttaa käänteiseltä ilmiöltä tilanteeseen, jossa paalun värähtelytaajuuden pitäisi pienentyä dynaamisen vastuksen ja siten paalun kantavuuden kasvaessa (kappale 5.1). Päältä täryttäminen on selkeästi erilainen asennustapa verrattuna tilanteeseen, jossa tärytin on jatkuvasti jäykästi kiinni paalussa, kuten putkileuoilla paalun ympäriltä kiinni tarrattaessa.

Venymäliuskoilla tallennetusta tärytysdatasta määritettiin FlexPro 6:lla paaluihin kohdistettu suurin dynaaminen ja staattinen voima, etsimällä jaksollisen käyrän suurin arvo tärytyksen viimeisen 30 sekunnin aikana. Määrittämisessä jätettiin huomioimatta yksittäiset toistumattomat huippuarvot kuvaajassa, vaan voima on määritetty vallitsevasta suurimmasta arvosta lopputärytyksen aikana. Taulukko 15 on esitetty paalujen asennusvoima lopputärytyksen aikana. On huomattavissa, että asennusvoiman suuruus on välillä 370...440 kN, jos paalun 6.1 arvoa ei oteta mukaan. Paalun 6.1 asennusvoima on merkillinen, sillä se on poikkeavan pieni ja vain puolet suurimmasta paalun 6.2 voiman arvosta.

**Taulukko 15.** Täryttämällä asennettujen staattinen ja dynaaminen asennusvoima.

Paalu nro	PDA RMX [kN]	Suurin staattinen voima viimeisellä 30 sekunnilla [kN]	Suurin dynaaminen + staattinen voima viimeisellä 30 sekunnilla [kN]
5.1	950	40	380
1.1	970	35	390
6.1	890	46	220
5.2	620	52	370
1.2	840	61	400
6.2	1000	68	440

On mahdollista, että kokeissa on tullut mittavirhe tai venymäliuska-loggeri-systeemissä on kalibrointivirhe. Koska mittaustulos on kuitenkin saatu, on kytkentöjen ja juotosliitosten oltava kunnossa. Mittausdataa tarkkailtaessa voidaan huomata, että ennen täryttämistä mittauksen nollakohta on siirretty 0 kN:n tuntumaan. Mittapaalua 6 on lisäksi käytetty toisen kerran, jolloin asennusvoima on ollut muiden paalujen asennusvoimien suuruusluokkaa. Nämä tekijät vähentävät epäilyä mittausvirheen mahdollisuudesta.



**Kuva 28.** Lopputärytyksessä paaluun kohdistuvat voimat ja paalun loppukantavuus.

On loogista, että asennuksen aikana paaluun kohdistuvien voimien ja loppukantavuuden välillä olisi yhteys. Kuva 28 on kuitenkin havaittavissa, että loppukantavuusarvot asennusvoiman perusteella esitettynä asettuvat todella hajalleen, mutta jos paalun 6.1 arvo jätetään huomiotta, voidaan piirtää lineaarinen regressiokäyrä, joka osoittaa, että ainakin näissä pohjaolosuhteissa asennusvoiman kasvaessa paalun loppukantavuus kasvaa. Lisäksi voidaan sanoa, että kun asennusvoima lopputärytyksessä on vähintään 350 kN, on päältä tärytetyllä paalulla edellytykset riittävään kantavuuteen.

## 7 TULOSTEN ANALYSOINTI JA VERTAILU

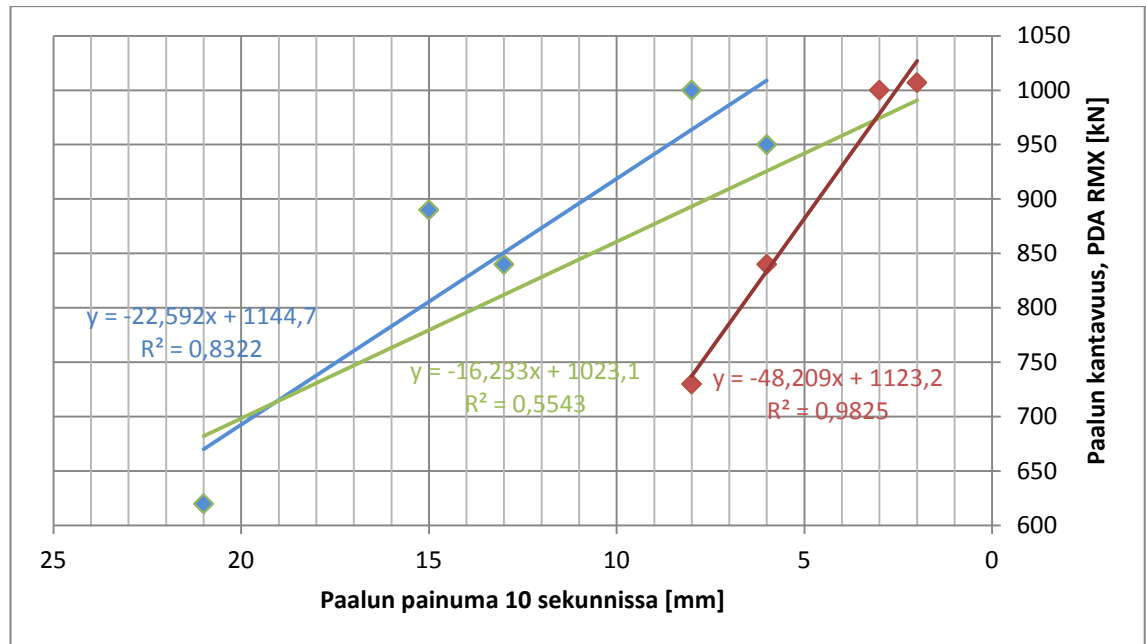
Turussa ja Kälviänjoella tehdyt kokeet antoivat osittain yhteneviä ja osittain eroavia tuloksia. Todennäköisesti siihen on syynä täysin erilaiset pohjaolosuhteet. Turussa paalut tärytettiin paksun ja pehmeän savikerroksen läpi tiiviiseen pohjamoreeniin. Kälviänjoella paalut läpäisivät silttisen hiekkakerroksen ja pysähtyivät tiiviiseen hiekkamoreeniin tai suureen kiveen. Alla on käyty läpi ja vertailtu koepaalutusten tulosten pääkohtia ja lopuksi on esitetty ohje tärytettyjen paalujen kantavuuden määrittämiseen ja paalutustyön suorittamiseen.

### 7.1 Kantavuus ja tunkeutumisnopeus

Molemmissa kokeissa päältä täryttämällä asennetuista paaluista kahdeksalle kymmenestä saatiin loppukantavuudeksi 800...1000 kN. Tätä voidaan jo pitää jo riittävänä kantavuutena työtelinepaalulle suurimmassa osassa urakoitsijan kohteista. Kokeiden perusteella tällä menetelmällä saadaan lähes yhtä suuria kantavuuksia kuin lyöntikalustolla, jota on perinteisesti työtelinepaalutuksessa käytetty. Lyöntipaalutuskoneena on käytetty laitetta, jossa iskujärkäleenä on vaijeriripuisteinen kahden tonnin järkäle, jota pudotetaan noin metrin korkeudelta paalun päähän.

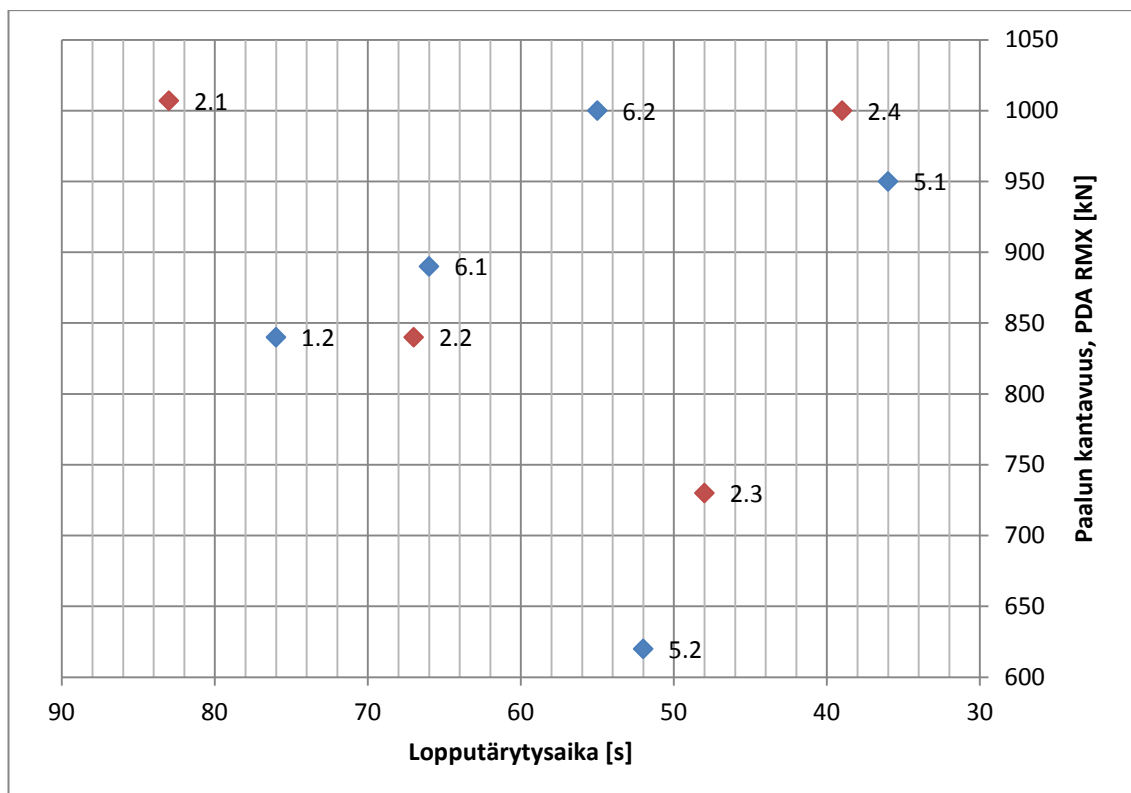
Turun kokeissa mitatut 30 ja 10 sekunnin painuma-arvot ilmaisevat paalun kantavuutta lineaarisemmin kuin Kälviänjoen kokeissa mitatut. Syynä tähän on todennäköisesti Turun koekohteen tasarakeisemmat pohjaolosuhteet. Molempien kokeiden tulosten nojalla voidaan perusteella, että maan dynaamisen vastuksen kasvaessa ja paalun tunkeutumisen siten hidastuessa paalun kantavuus kasvaa. Viimeisen kymmenen sekunnin aikana tapahtunut painuma kertoo luotettavammin paalun kantavuudesta etenkin Kälviänjoen tuloksia tarkasteltaessa. Kuva 29 on yhdistettynä Turun ja Kälviänjoen kokeissa tärytettyjen paalujen kantavuudet viimeisen 10 sekunnin painuman funktiona. Turun kokeiden paalut ovat punaisella värillä ja Kälviänjoen sinisellä. Vihreällä on piirretty lineaarinen regressiokäyrä yhdistettyjen tulosten perusteella.

On mahdollista, että paalujen loppukantavuus olisi myöhemmin suoritettavassa mittauksessa suurempi, kun vaippakantavuus on alkanut kehittyä. Mittaushetkellä maakerrokset ovat häiriintyneet tärytyksestä ja paalu kantaa kuorman lähes pelkästään kärjellään. Myöhemmin maakerrosten asettuessa tiiviimmin paalun vaippaa vasten ja huokosveden ylipaineen lasiessa paaluille muodostuu myös vaippakantavuutta. Koetärytyksen jälkeinen PDA-mittaus kuitenkin palvelee hyvin työtelineen rakentamisen tilannetta, jossa juuri asennettujen paaluihin kohdistuu työtelineen kansirakenteen ja työmaaliikenteen kuormat.



**Kuva 29.** Turun ja Kälviänjoen kokeiden paalujen kantavuus 10 sekunnin painuman funktiona. Turun kokeiden paalut ovat punaisella värillä ja Kälviänjoen sinisellä. Vihreällä on kaikkien tulosten yhteinen regressiokäyrä.

Kuva 29 voidaan huomata, että 10 sekunnin painuma-arvo ei ilmaise paalun kantavuutta samalla tavalla kitka- ja koheesiomaassa. Saattaa olla että Turun kokeessa saven muodostama vaippavastus hidasti paalun painumaa täytyksen aikana. Molemmissa kokeissa paalun kärki pysähtyi lähes samanlaiseen pohjaan tiiviiseen moreenikerrokseen, josta saatiin PDA-mittauksella lähes samansuuruisia kantavuuksia. Molempien kokeiden tulosten mukaan sovitettua vihreätä käyrää ei voida käyttää yleispätevänä tapana määrittää paalun kantavuutta tietyssä ajanjaksossa tapahtuneen painuman perusteella. Lopputäytyksen aikaisen painuman ja paalun kantavuuden välinen yhteys riippuu aina maan ominaisuuksista.

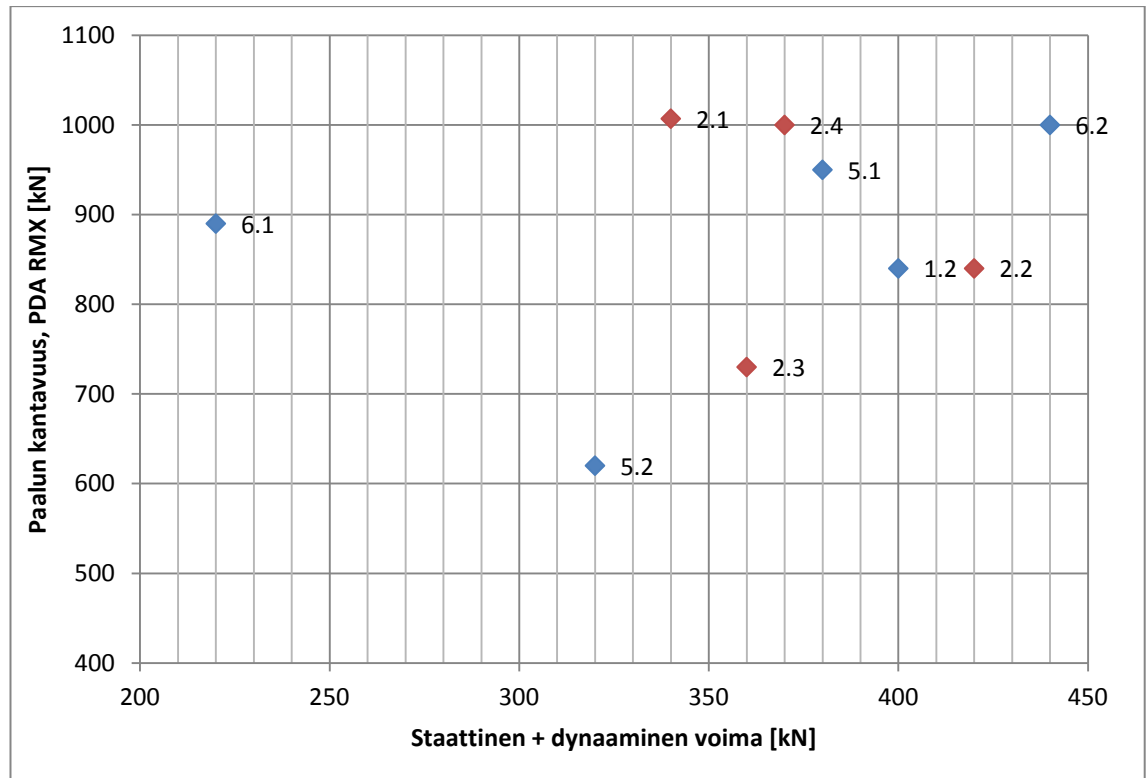


**Kuva 30.** Paalujen lopputärytyksen kokonaisaika.

Lopputärytyksestä kuvatuista videoleikkeistä määritettiin lopputärytykseen käytetty kokonaisaika. Paalukohtainen tärytysaika on esitetty Kuva 30. Punaisella on merkitty Turussa tärytetyt paalut ja sinisellä Kälviänjoella tärytetyt paalut. Kuten Kuva 30 voidaan huomata, kokonaislopputärytysajalla ei vaikuta olevan yhteyttä saavutettuun loppukantavuuteen. Alle 40 sekunnin lopputärytykselläkin on paalulle saatu 1000 kN kantavuus. Ilmeisesti joissakin tilanteissa paalu on mennyt hyvin tiiviiseen kerrokseen ympäriltä kiinni pitäen täryttämällä, jolloin paalu on vaatinut vain lyhyen tärytyksen päältä.

## 7.2 Asennusvoima

Kuva 31 on esitetty paalukohtainen lopputärytyksessä kohdistunut asennusvoima eli staattinen painatusvoima ja dynaaminen voima yhteenlaskettuna. Punaisella on merkitty Turun kokeiden paalut ja sinisellä Kälviänjoen kokeiden paalut. Ehdotonta riippuvuutta asennusvoiman suuruuden vaikutuksesta paalujen loppukantavuuteen ei voida johtaa. Kuvasta 30 voidaan kuitenkin huomata heikko riippuvuus ja suunta, jota pisteet noudattavat. Asennusvoiman kasvaessa paalun loppukantavuus kasvaa. Koko tutkimuksen koepaalujen asennusvoiman verrannollisuus paalun loppukantavuuteen ei ole yhtä selkeää, kuin Kälviänjoen kitkamaahan tärytettyjen koepaalujen. Ainoastaan paalun 6.1 arvo poikkeaa täysin muiden paalujen suunnasta. Näin pienellä koepaalujen määrällä riippuvuutta ei voida kuitenkaan perustella luotettavasti.



**Kuva 31.** Paalukohtainen yhteenlaskettu staattinen ja dynaaminen voima.

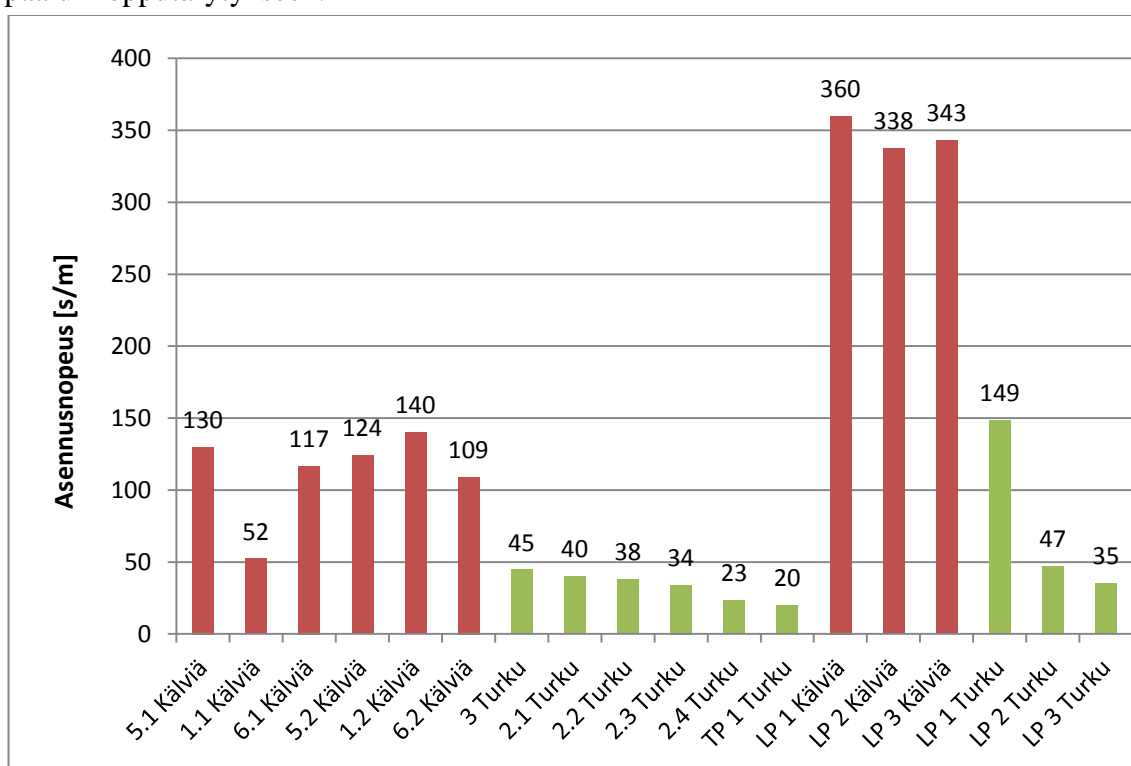
### 7.3 Tärytystaajuus

Koetuloksista voitiin havaita, että kitkamaahan paaluja täryttämällä asennettaessa jaksollisen voiman taajuus on lähes jokaisessa asennustilanteessa täryttimen maksimitaajuus. Todennäköisesti tähän oli syynä se, että tärytysliike saa paalun vaippavastuksen lähes mitätöityä kitkamaassa, etenkin vedellä kyllästetyssä maassa. Kälviänjoen pohjavedenpinta oli joen pinnan tasalla, joten kaikki paalut tärytettiin vedellä kyllästyneeseen kitkamaahan. Tällaisessa tilanteessa paalun kärkivastus hidastaa lähes ainoastaan paalun liikettä. Lopputärytystä paalun päältä tehtäessä tärytin kuitenkin iskee paalun päähän kärjen hidastumisesta huolimatta, jolloin tärytysvoimien taajuutta ei vähennä vaippa eikä kärkivastus. Turussa tehdyissä kokeissa jaksollisen voiman taajuutta saattaa vähentää koheesiomaan vaippavastus, joka tärytettäessä ei vähene kuten kitkamaassa, vaan mahdollisesti jopa kasvaa tärytystaajuuden kasvaessa, kuten kappaleessa 4.5 on käyty läpi.

Aikaisempien tutkimusten mukaan (kts. kappale 5.1) paalun värähtelytaajuuden pitäisi pienentyä dynaamisen vastuksen ja siten paalun kantavuuden kasvaessa. Näin tapahtuu varmasti tilanteessa, jossa tärytin on jatkuvasti jäykästi kiinni paalussa. Päältä tärytettäessä täryttimen taajuus ei välttämättä muutu samalla tavalla dynaamisen vastuksen mukaan, vaan tärytin lyö paalun päätä kärjen pysähtymisestä huolimatta. Tämä saattaa olla yksi syy miksi päältä täryttämällä saadaan paalulle merkittävästi suurempia kantavuuksia.

## 7.4 Työnsuoritus

Kokeiden perusteella paalujen asentaminen täryttämällä on sujuvampaa kuin lyömällä asentamalla. Koheesiomaassa ero ei ole merkittävä tai sitä ei ole lainkaan, mutta kitkamaassa täryttäminen on yli kaksinkertaisesti nopeampi paalujen asentamismenetelmä, kuin urakoitsijan yleisimmin käyttämä lyöntipaalutuskone. Kuva 32 on esitetty paalu-kohtaisesti kuinka monta sekuntia paalumetrin maahan painamiseen on kulunut. Vihreällä värillä on merkitty Turun kokeiden paalut ja punaisella Kälviän kokeiden paalut. Täryttämällä paalujen asentaminen vei alle puolet ajasta paalumetriä kohden Turun savimaassa verrattuna Kälviällä tärytettyihin paaluihin. Tähän on syynä varmasti se, että Turun kohteessa tiiviin moreenikerroksen päällä, johon paalut pysähtyivät, oli löyhä savikerros jolla kärkivastusta ei ollut lähes lainkaan. Suurin osa ajasta kului ainoastaan paalun lopputärytykseen.



**Kuva 32.** Turun ja Kälviän kokeiden asennuksen menekki

Todennäköisesti syynä täryttämisen edullisuuteen kitkamaassa paalujen asennusmenetelmänä on se, että jatkuva tärytysliike saa paalun vaippavastuksen lähes mitätöityä kitkamaassa (kappale 4.5), eikä avoimella paalulla ole paljoa kärkivastusta. Asennusajan mittausta on aloitettu hetkestä, jolloin tärytin tai lyöntipaalutuskone on saanut teräsputki-paalun asennuslaitteeseensa. Aikaan siis sisältyy paalun siirtäminen ja kohdistaminen asennuspaikalle ja paalun asentaminen pysähtymiseen saakka. Mahdollista paalun jatkamista hitsaamalla ei ole asennusaikaan laskettu, sillä jatkamisaika on molemmilla asennusmenetelmillä sama. Molemmat laitteet saavat siirrettyä paalun luontevasti viereensä asennuskohtaan, mutta lyöntipaalutuskoneen käyttö vaatii, että purkukouralla varustettu kaivinkone tuo paalun sen lähelle. Kaivinkoneeseen liitetty putkileuoilla va-



rustettu tärytin voi siirtää paalun itsenäisesti varastointialueelta asennuspaikalle ja aloittaa asennustyön välittömästi. Tämä tekijä lisää täryttämällä paalujen asentamisen sujuvuutta.

Kokeissa huomattiin, että putkileuoilla paalun ympäriltä täryttämiseen, telineessä käytettävät paalut 5,0 mm:n seinämällä ovat liian ohuita. Putkileuat luistavat paalun ympäriltä asennuksen aikana ja raapivat paalun pintaa ja painavat poikkileikkausta hieman soikeaksi. Puristusta ei voida lisätä, koska ohutseinämäinen paalu ei sitä kestäisi. Paalun soikeaksi muotoutuminen hankaloittaa paalun jatkamista hitsaamalla ja paalu on katkaistava kohdasta, jossa poikkileikkaus on vielä alkuperäisessä muodossaan. Koetilanteessa paalua tärytettiin ympäriltä kiinni pitäen niin kauan, että paalu pysähtyy ja vielä hetki pysähtymisen jälkeen tulosten vertailukelpoisuuden varmistamisen vuoksi. Varsinaisessa asennustilanteessa paalua puristamaton päältä täryttäminen voitaisiin aloittaa jo aikaisemmin, mikä mahdollisesti vähentäisi paaluun kohdistuvia vahinkoja.

## 7.5 Virhelähteet

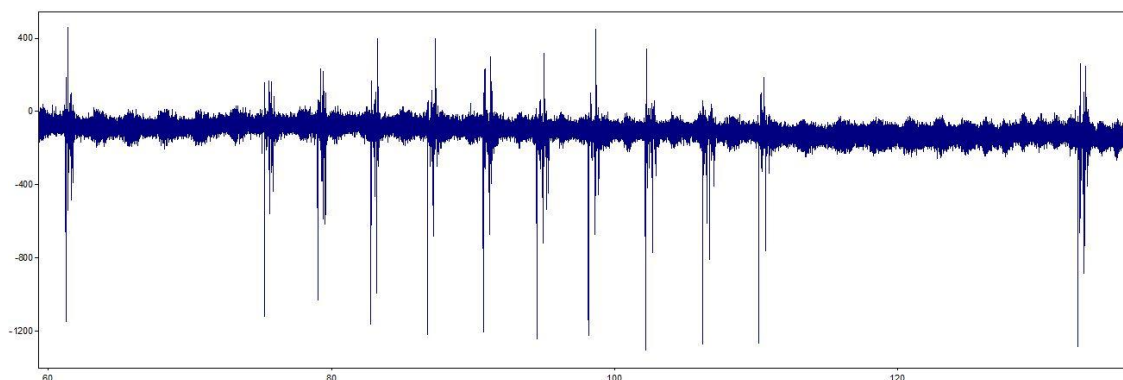
Tässä kappaleessa on käyty läpi kokeiden eri mittauksissa epätarkkuutta aiheuttavien virheiden lähteitä ja epätarkkuuden minimointia. Absoluuttiselle tai suhteelliselle virheelle ei ole järkevää laskea arvoa, sillä toistuvia täysin samanlaisissa olosuhteissa tapahtuvia mittauksia on vähän.

Suurin staattinen ja dynaaminen voima eli yhdessä asennusvoima määritettiin voima-aika-kuvaajasta silmämääräisesti FlexPro-ohjelmalla. Ohjelma antaa koordinaatit tarkasteltavalle pisteelle, jolloin virhettä arvon luennassa ei muodostu. Asennusvoiman suurinta arvoa luettaessa jätettiin huomioimatta toistumattomat piikit ja suurimman arvon valitseminen tehtiin siten mittaaajan harkinnan mukaisesti. Voiman arvon määrittämisessä pyrittiin johdonmukaisuuteen ja suorittamaan määrittäminen joka mittauksen kohdalla samalla tavalla.

**Taulukko 16.** Kälviällä tärytettyjen paalujen PDA-mitatut kantavuudet venymäliuska-loggerilla ja PDA-laitteistolla mitattuna.

Paalu nro	PDA RMX	Voima venymäliuskoilla mitattuna
	kN	kN
5.1	950	910
1.1	970	950
6.1	890	890
5.2	620	680
1.2	840	710
6.2	1000	1060

Venymäliuskamittauksen luotettavuutta testattiin jättämällä venymäliuskat kiinni loggeeriin PDA-mittauksen ajaksi. Venymäliuskoilla saatiin koekuormitusiskujen paaluun kohdistamat voimat mitattua, jolloin voitiin verrata voimien suuruuksia PDA-mittauksella saatuihin voimiin (Taulukko 16). Venymäliuskoilla mitatut voimat vastasivat hyvin PDA:lla mitattuja voimia, mikä antoi varmuuden venymäliuskamittauksen luotettavuudesta ja onnistuneesta kalibroinnista. Erot tulevat todennäköisesti siitä, että venymäliuskaloggerin mittaustaajuus on merkittävästi pienempi kuin PDA-mittalaitteiston, eikä se siten ehdi yhtä tarkasti iskussa paaluun kohdistuvia hetkellisiä voimia mittaamaan. Kuva 33 on esitetty paalun 6.2 venymäliuskoilla mitattu koekuormitusiskujen kuvaaja. Kuvasta on huomattavissa kahden koekuormitusiskun ja kymmenen iskun sarjan paalua kuormittava voima.



**Kuva 33.** Kuvakaappaus FlexPro-ohjelmasta: Paalun 6.2. venymäliuskoilla mitatut PDA-koelyönnit.

Tampereen teknillisen yliopiston rakennushallissa paaluihin kiinnitettyjen venymäliuskojen toimivuutta testattaessa ja kalibrointia tehtäessä huomattiin, että venymäliuskat reagoivat helposti lämpötilan muutoksiin, kun hallin ulko-ovi testauksen aikana avattiin. Paalun lämpötila saattaa myös muuttua tärytyksen aikana, mikä saattaa siirtää venymäliuskojen mittaaman voiman nollakohtaa. Ilmiön ei kuitenkaan huomattu haittaavan tärytysdatan tulkitsemista.

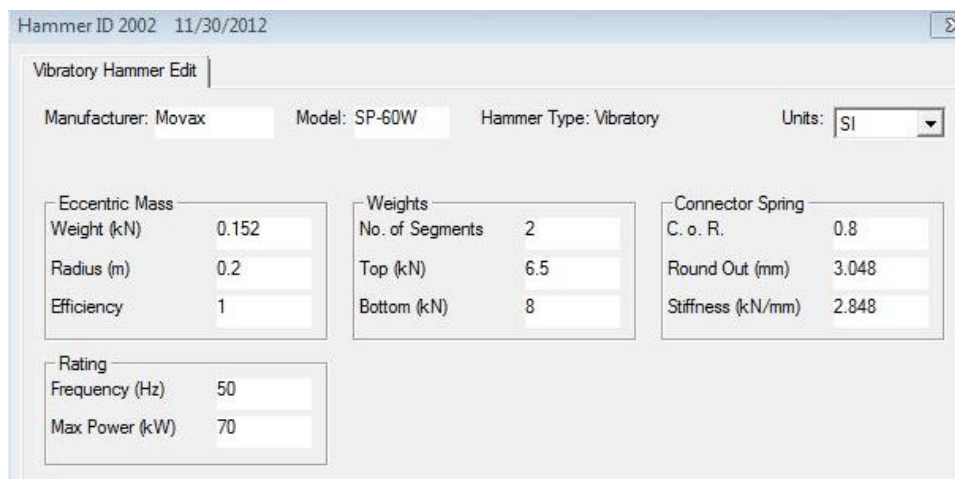
Kenttäkokeita tehtäessä mittalaitteille annettiin virtaa aggregaatilla, jonka antaman vaihtosähkön 50 Hz:n taajuus saattaa peittää alleen oleellista tärytysdataa, koska Movax SP-60W:n suurin tärytystaajuus on 50 Hz. Häiriö saatiin minimoitua maadoittamalla loggeri, mutta jaksollista tasaista aaltoa on havaittavissa hieman maadoituksen jälkeenkin, kuten Kuva 33 on havaittavissa. Ilman paalun kuormitusta venymäliuskamittauksessa 50 Hz:n häiriö näyttää aiheuttavan  $\pm 60$  kN:n virheen. Kun paaluun kohdistetaan asennusvoima, vaikuttaa häiriö häviävän heikompana signaalina tärytyksen alle. Tärytystaajuuden huomattiin olevan saman äänileikkeessä ja venymäliuskadatassa, joten vaihtosähköstä aiheutuva 50 Hz:n häiriö ei ole johdatellut tuloksia tärytystaajuutta määritettäessä.

Paalun painumaa tietyssä ajanjaksossa videoleikkeestä määritettäessä virhetä muodostuu varmasti. Osassa kuvatuista lopputärytyksistä videon kuva on hetkellisesti epätarkka kameran tarkentaessa takana olevaan maastoon paalun liikkuessa sivuttaissuunnassa. Paalun pintaan kiinnitetyn mittaviivaimen millimetrimerkinnot pystyttiin

silti lukemaan videosta. Arvo riippuu hieman myös videon pysäytyshetkestä, sillä paalu liikkuu jatkuvasti ylös ja alas. Mittauksen tarkkuutena voidaan pitää  $\pm 2$  millimetriä. Lopputärytyksen aikana tapahtunut painuma mitattiin vaaituskoneella, jolla pystyttiin yhden millimetrin tarkkuuteen. Vaaitetulla kokonaispainuman arvolla voitiin arvioida videoleikkeestä määritetyn painuman todenmukaisuutta ja tarvittaessa korjata sitä.

## 7.6 GRLWEAP-simulointi

Kokeissa käytetty Movax SP-60W putkeniskijä mallinnettiin GRLWEAP-ohjelmalla Kuva 34 esitetyillä parametreilla. Epäkeskopainojen massa ja säde valittiin niin, että lausekkeella 1 (kappale 2.1) saadaan epäkeskomomentille arvoksi noin 61 kNm. Taa-juus ja suurin teho ovat valmistajan ilmoittamat. Täryttimen paino 1450 kg on jaettu ohjelmassa kahteen osaan, täryttämättömään ja täryttävään osaan (650 kg + 800 kg), joiden välissä on vaimennuskumit (connector spring), joiden jousivakion arvo on saatu Movax Oy:ltä. Muut vaimentimien parametrit on saatu käyttämällä GRLWEAP-ohjelman laitekirjastosta löytyvän erään täryttimen arvoja, jonka teho on lähes yhtä suuri kuin Movax SP-60W:llä.



Hammer ID 2002 11/30/2012

Vibratory Hammer Edit

Manufacturer: Movax Model: SP-60W Hammer Type: Vibratory Units: SI

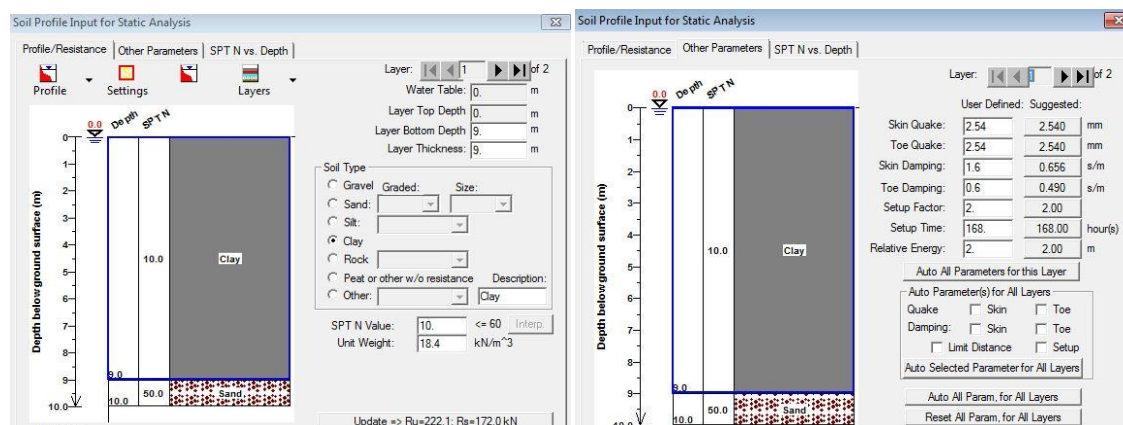
Eccentric Mass		Weights		Connector Spring	
Weight (kN)	0.152	No. of Segments	2	C. o. R.	0.8
Radius (m)	0.2	Top (kN)	6.5	Round Out (mm)	3.048
Efficiency	1	Bottom (kN)	8	Stiffness (kN/mm)	2.848

Rating	
Frequency (Hz)	50
Max Power (kW)	70

**Kuva 34.** Movax SP-60W -putkeniskijän mallintamiseen käytettävät parametrit GRLWEAP-ohjelmassa.

Molempien koekohteiden pohjaolosuhteet mallinnettiin GRLWEAP-ohjelmalla maakerroksen syvyyden mukaan kasvavalla vaippa- ja kärkivastuksella. Maan paalutusvastuksen arvot määritettiin sijoittamalla ohjelmaan maakerrosten SPT-kairauksen N-arvot. Koekohteissa on tehty puristin-heijarikairauksia, joten niillä saadut kärkivastuksen arvot ja nettolyöntiluvut on muutettu ensin CPT-kairauksen kärkivastuksen arvoiksi ja sitten SPT-kairauksen N-arvoiksi. CPT-kärkivastus saatiin puristinkairausvaiheen nettokärkivastuksesta kertomalla vastus luvulla 1,07 ja heijarikairausvaiheen nettolyöntiluvusta kertomalla vastus luvulla 0,83 (Rantala ja Halkola, 1997). CPT-kärkivastuksesta SPT-kairauksen N-arvo on saatu savelle jakamalla luvulla 0,19, siltile jakamalla luvulla 0,58 ja moreenille jakamalla luvulla 0,77 (Kara, 2010.)

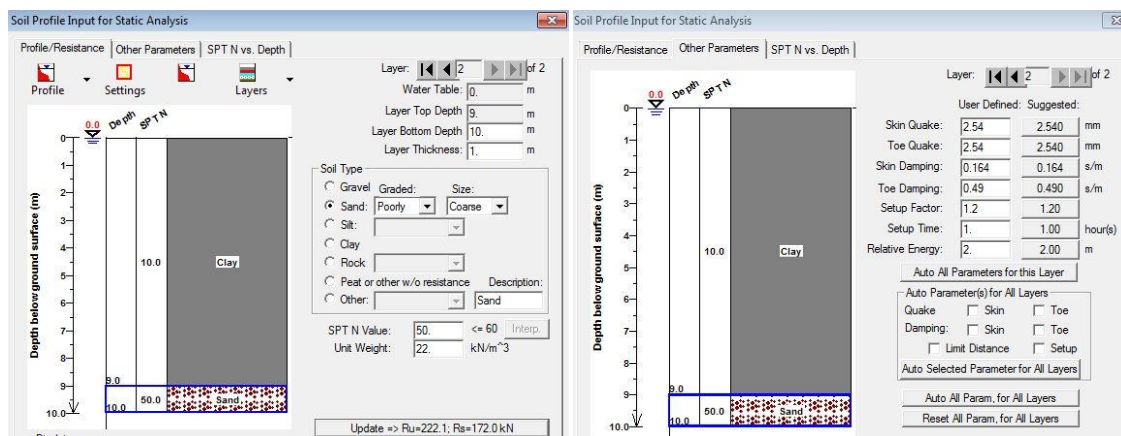
Turun kokeista paalu 2.1 valittiin GRLWEAP-ohjelmalla mallinnettavaksi, koska paalun asennus vastasi optimaalista tilannetta, jossa kantavuus on suuri ja lopputärytyksen painumanopeus korreloi hyvin kantavuuden kanssa. Paalu saatiin tärytettyä maahan hieman yli 10 metriä. Paalu tärytettiin työtelineen Aurajoen läntisen rantamuurin puolelle, jossa pohjatutkimusten mukaan on noin 9...10 metriä savea. Mallinnettaessa asennustilannetta oletettiin, että paalu painui enintään yhden metrin tiiviiseen moreeniin ja 9 metriä saveen. Alla olevissa kuvissa 35 ja 36 on esitetty pohjaolosuhteiden mallinnus GRLWEAP-ohjelmassa.



**Kuva 35.** Kuvakaappaus GRLWEAP-ohjelmasta. Kirjastosillan savikerroksen mallinnus.

Maakerrokset luotiin mallinnukseen GRLWEAP-ohjelman ”Static Analysis” -työkalun avulla. Työkalulla määritettiin ensin vedenpinnan korkeus ja savikerroksen paksuus (Kuva 35). Saven tilavuuspainon ohjelma arvioi SPT-kairauksen N-arvon sijoittamisen jälkeen. N-arvo määritettiin edellä mainittujen kertoimien avulla. Seuraavassa työkalun välilehdessä määritettiin maakerroksen käyttäytymistä tarkentavia parametreja. Mallinnuksessa käytettiin ohjelman tilavuuspainon ja N-arvon perusteella ehdottamia parametreja, paitsi vaippa- ja kärkivaimennukselle. Niiden arvoja suurennettiin, siten että paalun tunkeutumisnopeudelle saatiin koepaalutusta vastaava arvo.

Kärkivaimennusta suurennettiin vain vähän, koska paalu oli päästään avoin, ja saven kärkivastus on pieni. Vaippavaimennuksen arvoa suurennettiin enemmän, koska kokeissa ja kirjallisuustutkimuksissa todettiin, että koheesiomaan vaippavastus hidastaa korkeataajuista paalun tärytysliikettä merkittävästi. Käytetty arvo määritettiin kokeilemalla, ja 1,6 oli suurin arvo, jolla oli mielekäs vaikutus tärytyksen hidastumiseen ja täryttimen tehoon. Käytettyä suurempi arvo olisi vaikuttanut jo liian paljon tunkeutumisnopeuteen. Moreenikerroksen N-arvo ja tilavuuspaino määritettiin samalla tavalla kuin savikerroksenkin arvot. Maakerroksen käyttäytymistä paalutuksen aikana määrittävät parametrit jätettiin ohjelman antamiin oletusarvoihin.



**Kuva 36.** Kuvakaappaus GRLWEAP-ohjelmasta. Kirjastosillan moreenikerroksen mallinnus.

Koetilanne mallinnettiin käyttämällä ”Bearing graph - proportional shaft resistance” -analyysiä. Analyysissä vaippavastus on prosentuaalinen arvo laskennassa käytettävän loppukantavuuden arvosta (Ultimate Capacity). Vaippavastukselle käytettiin arvoa 70 %, jolloin kärkivastukselle jäi 30 %. Kärki- ja vaippavastuksen suhde valittiin sillä perusteella, että kärjestään avoimella paalulla tunkeutumisen vastus muodostuu lähes ainoastaan vaipan ulko- ja sisäpinnalla. Laskentaa varten on annettava kymmenen loppukantavuuden arvoa, joilla ohjelma analysoi ja laskee tärytystapahtuman parametrit. Kokeilemalla loppukantavuuden arvoja välillä 100...1000 kN huomattiin, että paalun tunkeutumisnopeus pienenee merkittävästi 300 ja 400 kN:n välillä. Analyysi tehtiin uudestaan 300...390 kN:n vaihteluvälillä. Loppukantavuudeksi paalulle saatiin noin 380 kN, sillä seuraavalla arvolla paalun tunkeutuminen pysähtyy täysin (Kuva 37). Täryttimen taajuutena mallinnuksessa käytettiin venymäliuskoilla todellisesta tilanteesta määritettyä 42 Hz:ä.

Tampere University of Technology  
Kirjastosilta, läntinen maatuki

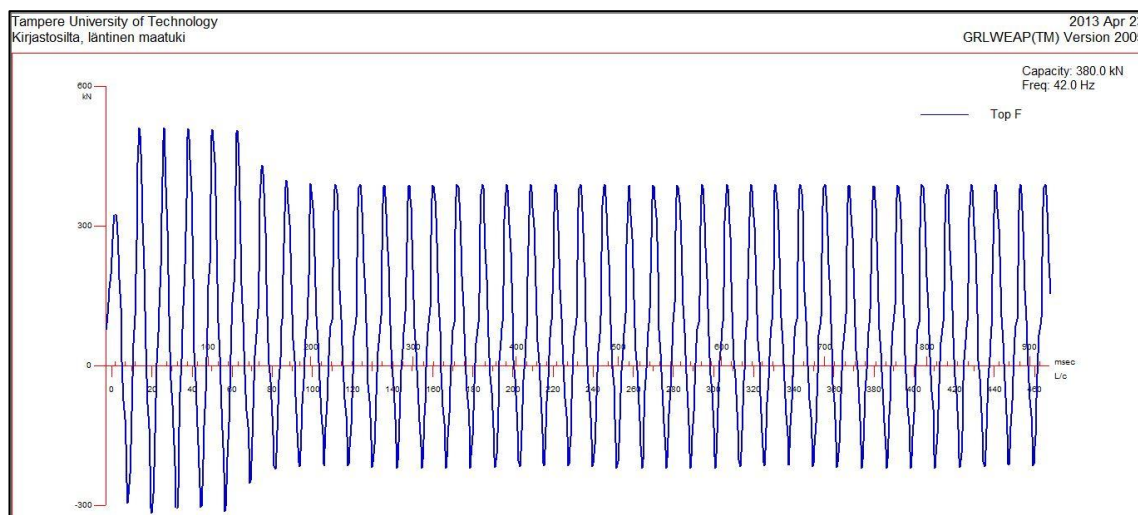
23-Apr-2013  
GRLWEAP (TM) Version 2005

Ultimate Capacity kN	Maximum Compression Stress MPa	Maximum Tension Stress MPa	Set mm/10 sec	Hammer Frequency Hz	Power kw
300.0	73.14	35.25	244.5	42.00	69.69
310.0	73.81	36.54	204.9	42.00	69.69
320.0	74.49	37.81	166.7	42.00	69.66
330.0	75.16	39.02	131.6	42.00	70.02
340.0	75.81	40.17	98.9	42.00	70.00
350.0	76.47	41.29	68.6	42.00	70.00
360.0	77.13	42.36	41.2	42.00	69.66
370.0	77.81	43.40	16.6	42.00	69.66
380.0	103.21	65.34	1.1	42.00	69.99
390.0	103.93	66.42	0.0	42.00	69.64

**Kuva 37.** Kuvakaappaus GRLWEAP-ohjelmasta. Mallinnetun paalun määritetty tunkeutumisnopeus ja vastaavat loppukantavuuden arvot.

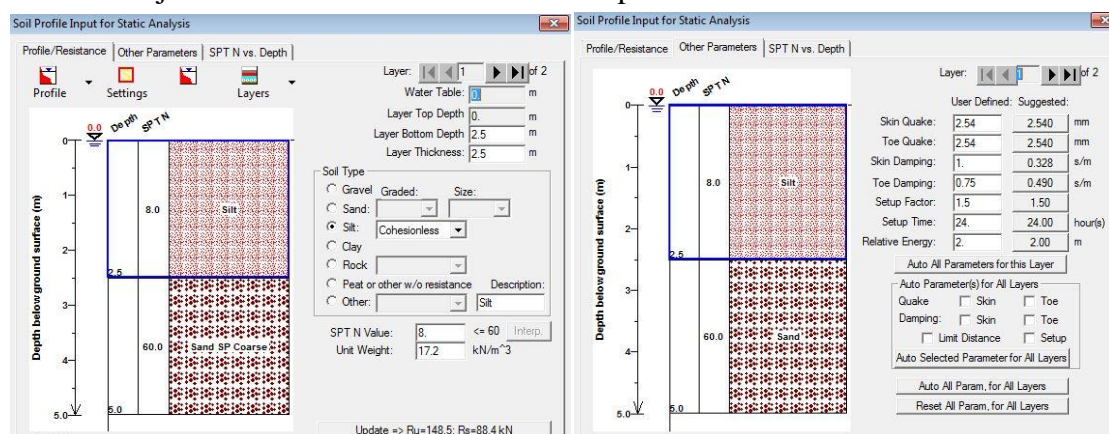


Loppukantavuuden arvo on pieni verrattuna todelliseen kantavuuteen, vaikka tunkeutuma kymmenen sekunnin aikana on hyvin lähellä todellisen tapahtuman arvoa. Tämä johtuu siitä, että mallinnettu tärytin ei pysty mobilisoimaan täyttä murtokuormaa. Venymäliuskoilla määritetty paaluun kohdistunut asennusvoima (340 kN) on myös linjassa GRLWEAP-ohjelman laskeman paalun päähän kohdistuvan voiman kanssa, kuten Kuva 38 näkyvän jaksollisen voiman huippukohdista voidaan huomata.



**Kuva 38.** Kuvakaappaus GRLWEAP-ohjelmasta. Mallinnetun paalun päähän kohdistunut asennusvoima ajan funktiona.

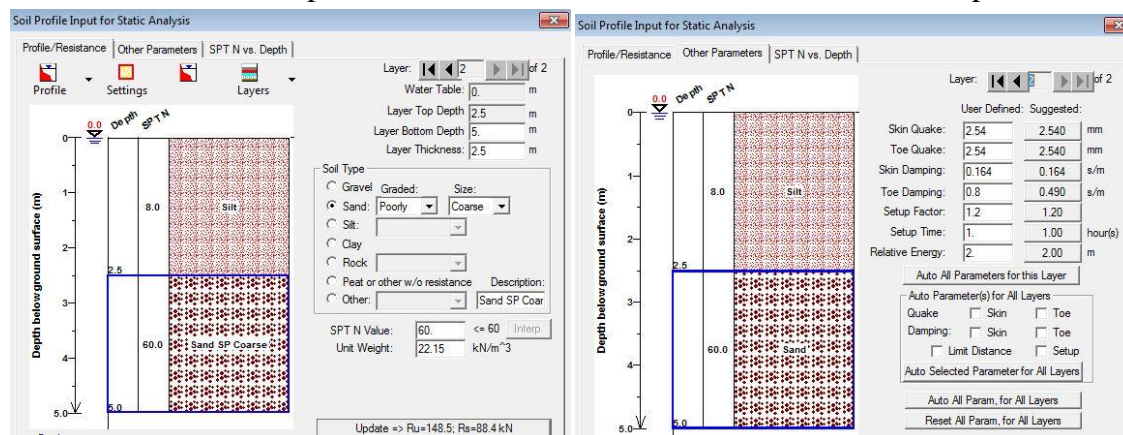
Kälviänjoen ratasillan kokeissa asennetuista paaluista mallinnettiin paalu nro 6.2, koska sen lopputärytyksen painuman arvo vastaa hyvin loppukantavuutta ja paalu saatiin asennettua syvimmälle koepaaluista. Maakerrokset mallinnettiin samalla tavalla kuin Turun Kirjastosillan asennustilannetta mallinnettaessa. Pohjatutkimusten perusteella maaprofiili mallinnettiin siten, että 2,5 metriä paksun tiiviin silttikerroksen alla on 2,5 metriä paksu tiivis moreenikerros. Alla olevissa kuvissa 39 ja 40 on esitetty savisen silttikerroksen ja moreenikerroksen mallintamisen parametrit.



**Kuva 39.** Silttikerroksen parametrit mallinnuksessa.

Koska silttikerroksen seassa on pohjatutkimusten mukaan myös hieman savea, suurennettiin kerroksen vaippavaimennuksen arvoa. Paalulla oli tässä maakerroksessa selkeästi vaippakitkaa, joka hidasti paalun asentamista lyömällä merkittävästi täryttämiseen ver-

rattuna. Kärkivaimennusta suurennettiin hieman, vaikka paalu oli päästään avoin, koska tärytyksessä kitkamaassa vaippakitkan vaikutus pienenee merkittävästi, joten tärytystä vaimentaa pääasiassa paalun kärjen vastus. Käytetyt arvot määritettiin jälleen kokeilemalla, siten että saatiin paalulle lähes koetilannetta vastaava tunkeutumisnopeus.



**Kuva 40.** Moreenikerroksen parametrit mallinnuksessa.

Mallinnus tehtiin samalla GRLWEAP-ohjelman analyysillä kuin Turussa tärytettyä paalua mallinnettaessa. Kokeilemalla loppukantavuuden arvoja välillä 100...1000 kN huomattiin, että paalun tunkeutumisnopeus pienenee merkittävästi 400 ja 600 kN:n välillä. Analyysi tehtiin uudestaan 460...550 kN:n vaihteluvälillä. Tunkeutumisnopeuden hidastumisen perusteella loppukantavuudeksi paalulle saatiin noin 490 kN (Kuva 41). Täryttimen taajuutena mallinnuksessa käytettiin venymäliuskoilla todellisesta tilanteesta määritettyä 46 Hz:ä.

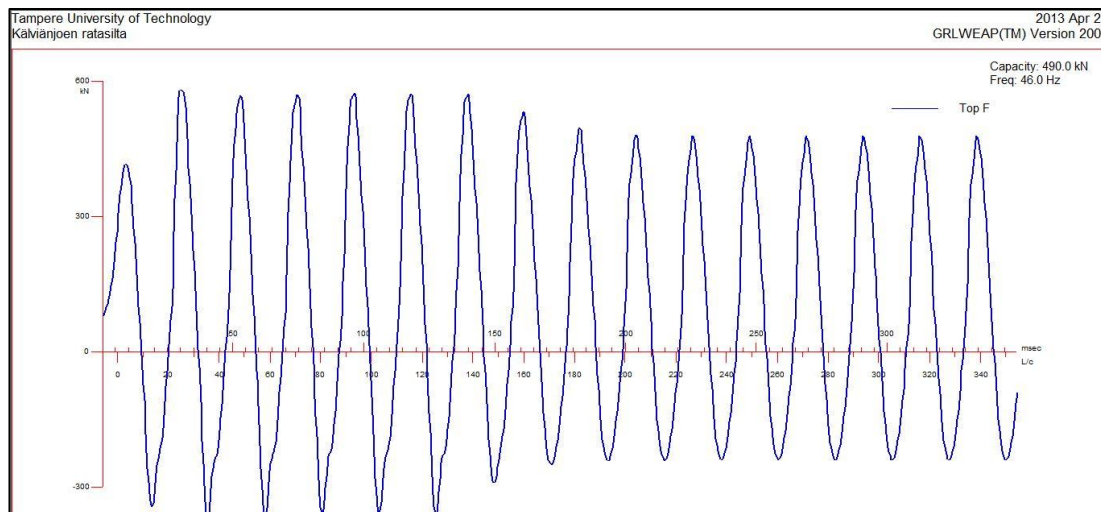
Tampere University of Technology  
Kälviänjoen ratasilta

25-Apr-2013  
GRLWEAP (TM) Version 2005

Ultimate Capacity kN	Maximum Compression Stress MPa	Maximum Tension Stress MPa	Set mm/10 sec	Hammer Frequency Hz	Power kw
460.0	94.06	45.48	88.3	46.00	68.55
470.0	94.72	46.40	55.2	46.00	67.69
480.0	95.36	47.30	28.0	46.00	66.38
490.0	96.18	48.25	6.8	46.00	65.93
500.0	119.10	75.18	0.0	46.00	64.42
510.0	121.00	76.01	0.0	46.00	63.75
520.0	122.28	76.93	0.0	46.00	62.42
530.0	124.40	77.77	0.0	46.00	62.09
540.0	125.58	78.59	0.0	46.00	61.68
550.0	127.28	79.26	0.0	46.00	60.42

**Kuva 41.** Kälviänjoen ratasillan kaltaisissa olosuhteissa mallinnetun paalun määritetty tunkeutumisnopeus ja vastaavat loppukantavuuden arvot.

Loppukantavuuden arvo on tässäkin tilanteessa pieni verrattuna todelliseen kantavuuteen, vaikka tunkeutuma kymmenen sekunnin aikana on hyvin lähellä koetilanteen arvoa. Venymäliuskoilla määritetty paaluun kohdistunut asennusvoima (440 kN) on myös linjassa GRLWEAP-ohjelman laskeman paalun päähän kohdistuvan voiman kanssa, kuten Kuva 42 näkyvän jaksollisen voiman huippukohdista voidaan huomata.



**Kuva 42.** Kälvienjoen ratasillan kaltaisissa olosuhteissa mallinnetun paalun päähän kohdistunut asennusvoima ajan funktiona.

Molempien koetilanteiden mallintamisen perusteella voidaan huomata, että GRLWEAP-ohjelmassa mallinnettu Movax SP-60W tärytin ei saa tutkittavasta teräsputkipaalusta irti yhtä suuria kantavuuksia, kuin lyöntikalustolla tehty PDA-mittaus oikeassa koetilanteessa. Suurin osa mallinnetun tärytyksen laskennallisista tuloksista hiottiin kuitenkin vastaamaan koetilannetta säätelemällä maakerrosten käyttäytymistä sääteleviä parametreja oikeaan suuntaan. Ohjelmalla pystytään siis määrittämään paaluun kohdistunut jännitys asennustilanteessa ja suunnilleen oikean suuruinen tunkeutumisnopeus tärytyksen loppuvaiheilla, mutta se vaatii paljon tietoa maakerrosten käyttäytymisestä tärytystilanteessa ja ymmärrystä siitä miten ohjelma mallintaa käytettävän laitteiston ja täryttämisen, jotta analyysistä saadaan todenmukainen.



## 7.7 Menetelmä kantavuuden määrittämiseen työmaakäyttöön

Paaluja työmaalla asennettaessa ei ole järkevää työn sujuvuuden kannalta mitata muita parametreja kuin paalun painumaa tiettyssä ajanjaksossa. Tehoon tai energiatasapainoon perustuviin kaavoihin vaadittavia parametreja, kuten täryttimen hetkellistä tehoa tai paalun heilahdusnopeutta on lisäksi vaikea määrittää tärytysprosessista. Luotettavaa laskentakaavaa ei voida kehittää pelkkään tunkeutumismoiteen perustuen.

Selkeämpää on määrittää painumalle arvo (mm), jota paalu ei saa ylittää tiettyssä ajanjaksossa. Sallittu painuma tiettyssä ajanjaksossa määritetään riippuen kohteen työtelinepaalujen kantavuusvaatimuksista mitoitusarvoihin perustuen. Lopputärytyksen kokonaisaikaa tutkittaessa (kts. kappale 7.1) huomattiin, että paalun kantavuuden voidaan olettaa ainakin olevan riittävä, jos paalua on tärytetty päältä puolitoista minuuttia. Mikäli silmämääräisesti pysähtyy ennen 90 sekunnin kulumista, on paalua tärytettävä vielä 30 sekuntia, jotta varmistutaan, että paalu on todella pysähtynyt riittävän tiiviiseen kerrokseen. Paalun painumaa mitataan tästä ajanjaksosta viimeisen 10 sekunnin aikana.

Pohjaolosuhteista riippuva sallittu painuma voidaan määrittää Kuva 29. Esimerkiksi karkearakeisessa maassa 800 kN kantavuus saavutetaan, kun paalu painuu lopputärytyksen viimeisen 10 sekunnin aikana enimmillään 15 mm. Pohjaolosuhteissa, joissa paksun koheesiomaakerroksen jälkeen saavutetaan tiivis karkearakeinen kerros, riittävä suurin painuma on 6 mm 800 kN:n kantavuudelle (kts. kappale 7.1.1). Kymmentä sekuntia pidemmässä ajassa painuma-arvon vaihtelu on suurempaa, jolloin riittävän kantavuuden määrittämisen tarkkuus heikkenee, kuten kappaleista 6.4.1 ja 6.4.2 käy ilmi. Seuraavassa kappaleessa on esitetty edellä tehtyjen päätelmien perusteella laadittu työmaakäyttöön tarkoitettu työohje työtelinepaalujen asentamiseen.

## 7.8 Työtelinepaalujen asentaminen täryttämällä – työohje

### Vaadittava kalusto

- Tela-alustainen kaivinkone, painoluokka 25–30 tonnia
- Movax SP-60W -putkeniskijä ja kaivinkoneeseen asennettu Movaxin ohjausjärjestelmä

### Työn suoritus

1. Tarkastetaan pohjatutkimuksista paalun asentamisen tavoitesyvyys
2. Siirretään teräspankkipaalu halutulle paikalle kaivinkoneen ja siihen kiinnitetyn Movax-putkeniskijän putkileukojen avulla.
3. Tärytetään paalua painattaen niin kauan, kunnes paalun painuminen pysähtyy. Tarkkailtava, että paalun poikkileikkaus ei painu lyttyyn putkileukojen puristuksesta, jotta paalu on vielä jatkettavissa.
4. Paalun jatkaminen tehdään tarvittaessa hitsaamalla, hitsiliitoksen on oltava vähintään paalun seinämävahvuuden suuruinen.
5. Kiinnitetään lopputärytystyökalu putkeniskijän alaleukoihin ja asetetaan lopputärytystyökalun holkki paalun päähän paalun sisälle.
6. Tärytetään paalua lopputärytystyökalun välityksellä yhtäjaksoisesti vähintään puolitoista minuuttia tai niin kauan kuin paalu maahan vielä tunkeutuu. Kun paalun painuminen silmämääräisesti pysähtyy, tärytetään paalua vielä 30 sekuntia.
7. Seurataan paalun painumaa lopputärytyksen viimeisen 10 sekunnin aikana ja tarkkaillaan, että painuma ei ylitä vaaditulle kantavuudelle sallittua arvoa.
8. Kaivinkoneen telojen on lopputärytyksessä nouseva edestä irti maasta, jolloin voidaan olla varmoja, että kaivinkone kohdistaa suurimman mahdollisen painatusvoiman paaluun.
9. Mikäli paalun pää jäi merkittävästi korkeammalle kuin pohjatutkimuksilla havaittu kova kerros, määritetään paalun kantavuus mahdollisuuksien mukaan PDA-mittauksella tai loppulyöntiehdoilla lyöntikalustolla. Mikäli kantavuutta ei ole mahdollista määrittää lyöntikalustolla, tärytetään toinen paalu tavoitesyvyyteen edellisen viereen.

## 8 YHTEENVETO

Tutkimuksessa saatiin hyödyllistä tietoa kaivinkoneeseen kiinnitetyille täryttimellä asennettujen tukipaalujen käyttökelpoisuudesta. Paalujen asentaminen täryttämällä on sujuvampaa kuin kevyellä vaijeriripusteisella pudotusjärkäläellä asentamalla ja paaluille saadut kantavuudet ovat riittäviä urakoitsijan siltojen työtelineiden vaatimuksiin. Paalun lopputärytyksen ja painumanopeuden välille löydettiin looginen yhteys: paalun painuman hidastuessa loppukantavuus kasvaa. Lopputärytyksen painuman perusteella tehtiin tärytysohje vaaditun kantavuuden saavuttamiseksi.

Tietoa täryttimen parametrien vaikutuksesta paalun kantavuuteen ei saatu osittain siksi, että tutkimuksessa oli käytössä ainoastaan yksi tärytin. Amplitudin, taajuuden tai epäkeskovoiman ja siten epäkeskomomentin muutoksen vaikutusta paalun kantavuuteen tai tunkeutumiseen ei saatu selville. Maan vastuksen vaikutuksesta paalussa vaikuttavien voimien taajuuteen saatiin hieman selkoa, mutta taajuuden mahdollista yhteyttä paalun kantavuuteen ei saatu selville.

Paalujen asentaminen täryttämällä on tutkimusalue, joka vaatii paljon lisätutkimusta Suomen pohjaolosuhteissa. Paalujen täryttämällä asentamisen sujuvuus puhuu ilmiön tutkimuksen laajentamisen puolesta. Samanlaisten koepaalutuksen toistaminen erilaisissa pohjaolosuhteissa toisi laajempaa kokemusta täryttämisen sopivuudesta paalujen asentamiseen. Koepaalutuksia olisi hyödyllistä myös tehdä merkittävästi pidemmällä paaluilla, jotta saataisiin selville saadaanko niille riittävän suuria kantavuuksia kyseisellä laitteistolla.

Tärytystaajuuden, amplitudin ja paaluun kohdistetun tehon vaikutuksen paalun tunkeutumiseen ja kantavuuteen selvittämiseksi, olisi hyödyllistä kiinnittää paaluun myös kiihtyvyysanturit. Olisi myös informatiivista kiinnittää venymäliuska paalun kärjen ja pään tuntumaan, jotta pystyttäisiin tutkimaan tärytysenergian siirtymistä paalussa tarkemmin. Täyttä selkoa ei ole tulppaantuuko paalu tärytyksessä vai ei. Paaluja vetämällä ylös maasta täryttämisen jälkeen, saataisiin selville onko kärkeen muodostunut maatulppa. Tulpalla saattaa olla merkitystä paalun loppukantavuuden saavuttamiseen, sillä se hidastaa tärytettävän paalun liikettä.

## LÄHDELUETTELO

Arcelor Mittal Piling Handbook, 2008. Kahdeksas painos.

Barkan, D.D. 1962. Dynamics of Bases and Foundations. Translated from Russian by L. Drashevskaya and translation edited by G.P. Tschebotarioff, original title in Russian "Dynamicka Osnovaniya I Fundamentov", 1948. Moscow.

Bosscher, P.J., Menclova, E., Russel, J.S., Wahl, R.E. (1998), Estimating Bearing Capacity of Piles Installed with Vibratory Drivers., Technical Report CPAR-GL-98-2 July 1998, Prepared for; U.S. Army Corps of Engineers, Washington , DC 20314-1000, USA.

Hakanen, T. 2008. Teräspalkkipaalujen koekuormitusmenetelmien vertailu. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Tampere.

Heerema, E.P. 1979. Relationships between wall friction, displacement velocity and horizontal stress in clay and in sand, for pile driveability analysis. Ground Engineering, pp. 55-65.

GRLWEAP Procedures and Models, 2005. Pile Dynamics, Inc. GRLWEAP 2005 - ohjelman manuaali. Yhdysvallat.

Kara, O., Gündüz, Z. 2010. Correlation between CPT and SPT in Adapazari, Turkki

Kemppainen, H. 2006. Paalutustyöt vaikeasti läpäistävien täyttöjen kohdalla. Teknillinen Korkeakoulu. Espoo.

Lammertz, P., Richwien, W. 2006. Bearing capacity of open ended steel pipe piles vibrated in sand. Yhdysvallat.

Likins, G.E. Jr., Hussein, M. 1988. A Summary of The Pile Driving Analyzer Capacity Methods. CI

Massarsch, 2000. Vibratorers användningsmöjligheter vid drivning av pålar och spont. Pålkommisionen, Rapport 99. Linköping.

Movax Oy, 2012. Movax SP-60W –putkeniskijän tuote-esite. Saatavilla: [http://www.movax.com/pdf/BrochureSP60W\\_ENG.pdf](http://www.movax.com/pdf/BrochureSP60W_ENG.pdf)

O'Neill M.W., Vipulanandan, C. 1989a. Laboratory evaluation of piles installed with vibratory drivers. National Cooperative Highway Research Program. Report No. 316, National Research Council, Washington, DC. Vol. 1. pp. 1-51.

- O'Neill M.W., Vipulanandan, C., Wong, D.O. 1990. Evaluation of bearing capacity of vibro-driven piles from laboratory experiments. University of Houston, Texas, Yhdysvallat
- Rantala, K., Halkola H. 1997. Paalun kantavuuden arviointi puristin-heijarikairauksella. Geotekninen osasto julkaisu 74. Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto.
- Rao., Pramod, M. 1993. Effect of pile geometry and soil saturation in the behavior of nondisplacement piles installed by vibration. A MSc thesis. University of Houston, Texas, Yhdysvallat.
- Rausche, F. 2002. Modeling of vibratory pile driving. Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction, Balkema Publishers, Lisse.
- Rodger, A.A., Littlejohn, G. 1980. A study of vibratory driving in granular soils. Geotechnique, Vol. 30, No. 3, pp. 269-293.
- Tarhasaari, T. 2001. Teräspaaluille perustettu sillan tukiteline. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Tampere.
- TESPA, 1995. Technical European Sheet Piling Association, brochure 1995
- Viking, 2002. Vibro-driveability – A Field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology. Stockholm.
- Wang, H. 1994. Experimental study and finite element analysis of driveability and static behaviour of various piles installed by vibratory driving., A Doctoral thesis, University of Houston, Texas.
- Woods, R. 1997. Dynamic Effects of Pile Installations on Adjacent Structures. Synthesis of Highway Practice 253.

# LIITTEET

## Liite 1 Turun kirjastosillan pohjatutkimuspiirrustukset

- i. Pohjatutkimuskartta
- ii. Pituusleikkaukset, 1...6
- iii. Poikkileikkaukset, A...D

## Liite 2 Kälviänjoen ratasillan pohjatutkimuspiirrustukset

- i. Pohjatutkimuskartta
- ii. Pituusleikkaukset, itäinen ja läntinen rata
- iii. Poikkileikkaukset, tuki 1 ja 2

## Liite 3 Lopputärytystyökalu – mittapiirustus